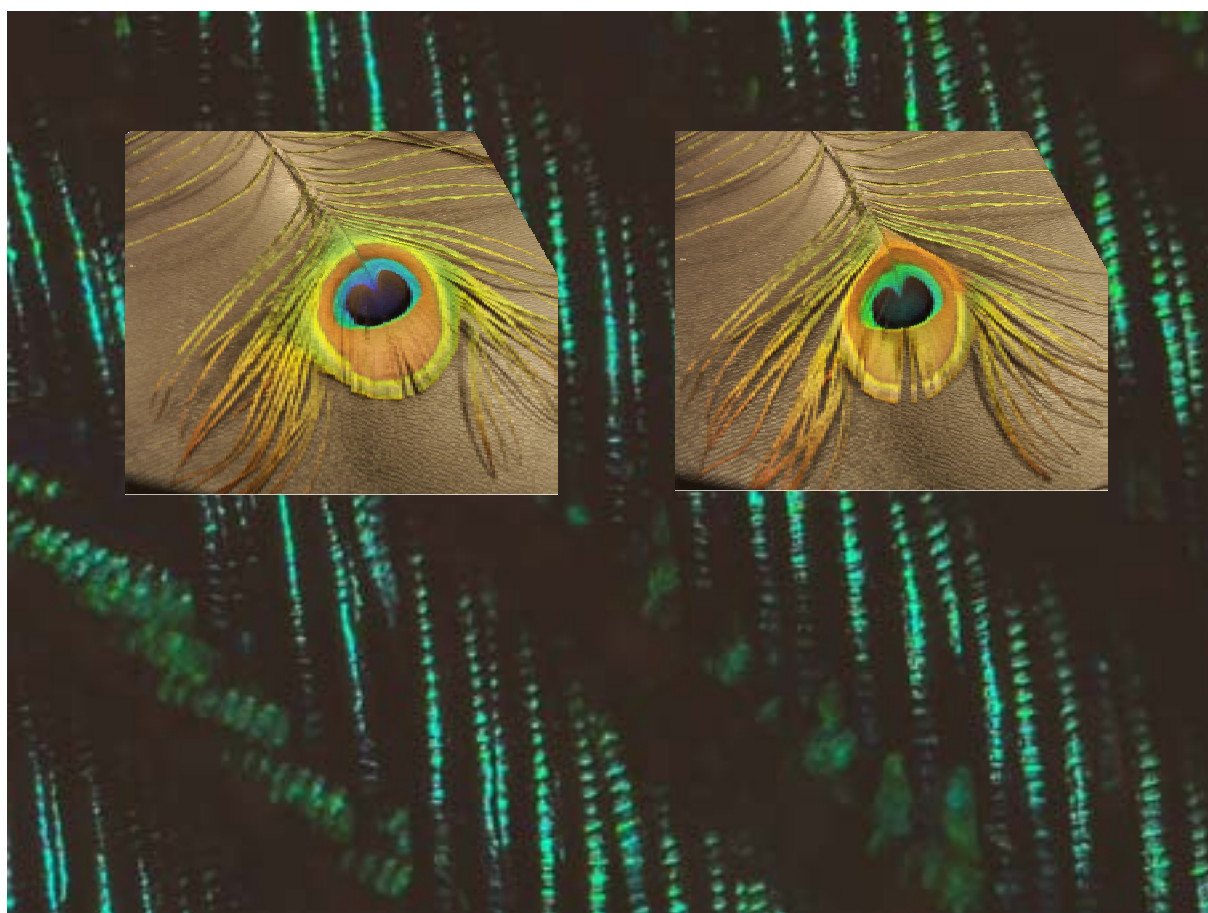


Styrbara signaturmaterial: forskning 2004-2005

Hans Kariis, Stefan Björkert, Jan-Olof Ousbäck, Hans Strifors, Anna Jänis, C-G Ribbing, Göran Forssell, Christina Nilsson, Tomas Hallberg, Eva H Karlsson



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Sensorteknik
Box 1165
581 11 Linköping

Tel: 013-37 80 00
Fax: 013-37 81 00

www.foi.se

Styrbara signaturmaterial: forskning 2004-2005

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1794--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år November 2005	Projektnummer E3068
	Delområde 62 Signaturanpassning	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Hans Kariis Stefan Björkert Jan-Olof Ousbäck Hans Strifors Anna Jänis C-G Ribbing	Projektledare Hans Kariis	
	Godkänd av Lena Klasén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Hans Kariis	
Rapportens titel Styrbara signaturmaterial: forskning 2004-2005		
Sammanfattning Projekt "Styrbara signaturmaterial", är ett tvåårigt projekt som startades 2004. Målet för projektet har varit att studera nya möjligheter till dynamisk signaturanpassning, med hjälp av styrbara signaturmaterial för både visuellt infrarött och radar. Forskningen inom projektet har givit framgångsrika resultat genom att vi bl a: Realiserat designad spektral emittans inom det infraröda området. Framställt en tredimensionell fotonkristall av berylliumoxid, modellering och mätning på denna har verifierats. Föreslagit temperaturtåliga radarabsorberande strukturer. Visat att den infraröda transmissionen genom en polymerkomponent kan styras. Undersökt möjligheterna att använda ytbeläggningar som skydd mot bistatiska radarsystem. Deltagit i kunskapsöverföring till och dialog med kund. Avslutningsvis ges några förslag på vidare verksamhet i ett kommande projekt, vars ambition är att under 2007 demonstrera en struktur som har goda signaturegenskaper inom de tre våglängdsområdena radar, IR och visuellt och som är styrbar i minst ett av frekvensbanden.		
Nyckelord Signaturanpassning, överlevnad, skydd, radar, infrarött, styrbar, multispektral, material		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 43 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1794--SE	Report type User report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	Month year November 2005	Project no. E3068
	Subcategories 62 Low Observables	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Hans Kariis Stefan Björkert Jan-Olof Ousbäck Hans Strifors Anna Jänis C-G Ribbing	Project manager Hans Kariis	
	Approved by Lena Klasén	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible Hans Kariis	
Report title (In translation) Adaptable Camouflage Materials 2004-2005		
Abstract The project “Adaptable Camouflage Materials” is a two year project that began in 2004. The objective of this project has been to study new possibilities for dynamic signature management, using adaptable camouflage materials both for visual, infrared and radar. The research has given successful results by for example: Realizing designed spectral emittance in the infrared region. Producing a three dimensional BeO photonic crystal, verification of modeling and measurements on it. Suggesting temperature resistant radar absorbing materials Showing that the infrared transmission through a polymer component can be regulated. Investigating the possibility to use surface coatings as protection from bistatic radar systems. Participating in dialogue with representatives from the costumer. As a conclusion, some proposals for research in future projects are presented. The objective for 2007 is to be able to demonstrate a structure that has interesting signature properties in all of the three wavelength ranges (radar, IR and visible) and is adaptable in at least one of the bands.		
Keywords Signature management, survivability, protection, radar, infrared, adaptable, multi spectral, material		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 43 p.	
Price acc. to pricelist		

Innehåll

BAKGRUND	6
INLEDNING	7
TERMOKROMA MATERIAL	7
Önskemål för signaturanpassning i det termiskt infraröda området	7
Solgel-framställning av VO ₂ -filmer och effekten av dopning med W och Re	8
LÅGEMISSION MASKERINGSFÄRG: SAMARBETSPROJEKT MED PVT	9
PIGMENT MED POTENTIAL ATT STYRA DE OPTISKA EGENSKAPERNA HOS EN YTA	11
SIGNATURREDUKTION MED FOTONKRISTALLER	12
Inledning och historik	12
Fotonkristaller av berylliumoxid	16
MATERIAL FÖR HÖGA TEMPERATURER	18
Radarabsorberande material för höga temperaturer	18
IR-egenskaper hos berylliumoxid vid höga temperaturer	23
DEPOLARISERANDE YTOR	25
RADARABSORBENTER OCH RADARSIGNATURER	27
Optimering av flerskiktsabsorbenter	28
Bistatisk spridning	28
Impedansrandvillkor	29
Magnetodielektriska radarabsorbenter	30
Avancerade partikelkompositer	30
LEDANDE POLYMERER FÖR MULTISPEKTRAL SIGNATURANPASSNING	31
Visuella området	31
IR-området	32
Radarområdet	32

FORSKNINGSPRODUKTION 2004-2005	34
FOI-rapporter	34
Vetenskapliga artiklar	34
Konferensbidrag	35
Avhandlingar	36
Patent	37
Medverkan vid initiering av övrig verksamhet	37
Kursmedverkan	37
Kunskapsförmedling till kund	37
Hårdvara	38
Samverkan	38
YTOR FÖR DEMONSTRATION 2007	39
Exempel 1: Styrbar Radomstruktur för mikrovågsområdet	39
Exempel 2: Yta med styrbar emissivitet (IR-området)	39
FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	40
REFERENSER	41

Bakgrund

Traditionellt har svenska arméförband signaturanpassat sig för att inte kunna upptäckas av det mänskliga ögat i svensk öppen eller småbruten terräng, se Figur 1. Flyg- och marinförband har kunnat signaturanpassa sig mot det mänskliga ögat vid basering i vegetationsterräng alternativt i luften eller på havet. Radarsignaturer för flyg och fartyg har i Sverige och på FOI studerats under flera år. Detta har givit underlag vid utveckling av Gripen, ett flygplan med avsevärt lägre radarsignatur än sina föregångare och Visby, ett fartyg med radarsignatur i världsklass.



Figur 1: Arméförband maskerat i traditionell svensk terräng

De senaste årens internationella utveckling och det svenska försvarets ominriktning från invasionsförsvar till insatsförsvar har radikalt förändrat behovet av signaturanpassning. Vi ska i framtiden kunna verka i många vitt skilda miljöer, ofta i komplex stadsmiljö. Uppdragen kommer snabbt att kunna växla från humanitärt bistånd till väpnad strid. Utvecklingen av bättre, billigare, tillgängligare och multispektralare sensorer går snabbt. För att möta nya behov av signaturanpassning startade FOI 2004, på Forsvarsmaktens uppdrag, det tvååriga projektet ”Styrbara signaturmaterial”. Detta är projektets slutrapport.

Det nya försvaret, med fokus på internationella operationer, ställer därmed primärt två nya krav på framtida signaturanpassning:

Styrbarhet och multispektralitet

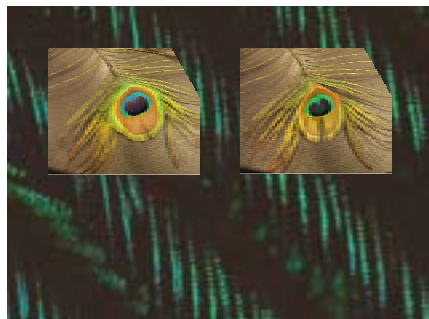
Med styrbarhet menar vi att signaturen ska kunna ändras med hänsyn till:

- Bakgrunden
- Uppdragets art
- Vädret
- Sensorhotet

Med multispektralitet menar vi att signaturanpassningen samtidigt ska fungera i:

- Synligt ljus
- Nära IR (bildförstärkare)
- Termisk IR
- Radar (mm- och mikrovågsområdet)

I varje aktivitet inom projektet tillämpas ett styrbart och multispektralt tänkande. Operativ materiel, som nyttiggör projektets resultat, kan tidigast tänkas finnas tillgänglig för Nordic Battle Group 2011, i vissa delar ännu senare. Det kortsiktiga målet är att bygga upp kunskap för att kunna demonstrera en styrbar multispektral yta hösten 2007.



Omslagsbilden: Påfågels fjädrar får inte sin färg från traditionella pigment utan färgen skapas av fotonkristaller, periodiska strukturer som reflekterar en bestämd del av spektrat. I den vänstra infällda bilden är det luft i strukturens mellanrum, i den högra har luften bytts ut mot acetone, som har ett annat brytningsindex. Fjädern ändrar då färg, vilket visar att det är frågan om en fotonkristallin struktur. Bakgrundsbilden visar en förstoring av strukturen.

Inledning

Vid FOA/FOI har det länge forskats kring signaturanpassning. Den första rapporten beträffande radarabsorbenter gavs ut 1958¹. Tidigare har forskningen vid FOI rörande material för signaturanpassning varit strikt våglängdsuppdelad; optik i ett projekt, radar i ett annat. Forskningen har nästan uteslutande handlat om statisk signaturanpassning, dvs när ett material väl har designats för att erhålla önskad signatur har den inte förändrats. Både **styrbarhet** och **multispektralitet** är alltså för FOI nya tankar.

Den kunskap som byggts upp i tidigare projekt om statisk monospektral signaturanpassning har dock varit av avgörande betydelse för genomförandet av projektet "Styrbara signaturmaterial". De projekt som i första hand bidragit med grundförutsättningar är:

Optiska signaturmaterial (2001-2003, PL Tomas Hallberg)²

Avancerade radarabsorbenter (2001-2003, PL Jan-Olof Ousbäck)³

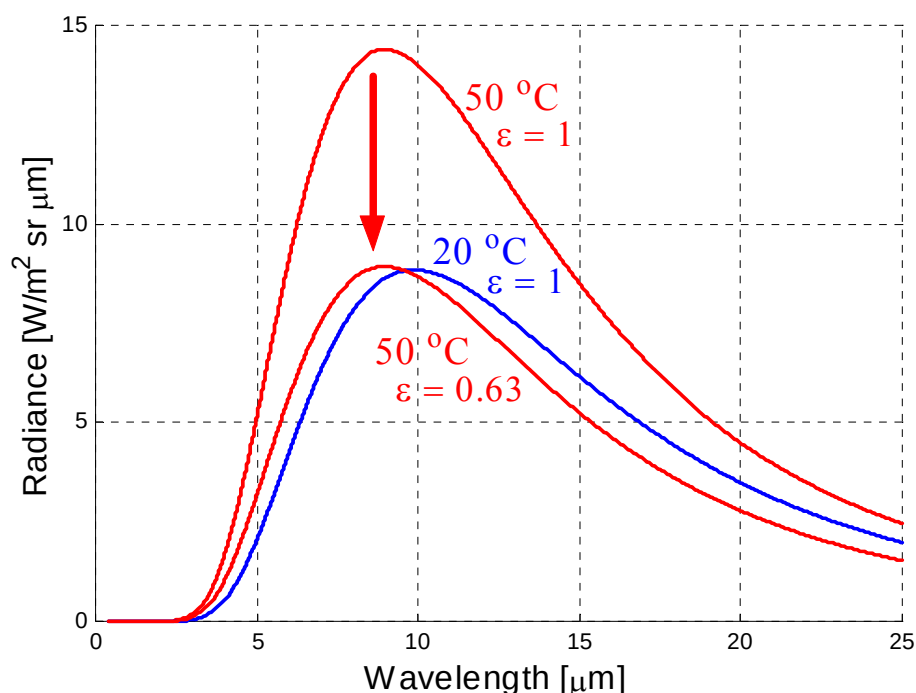
Modellering av signaturmaterial (2002-2004, PL Jan Fagerström)⁴

Nanokompositmaterial (2000-2004, PL Steven Savage)⁵

Termokroma material

Önskemål för signaturanpassning i det termiskt infraröda området

Alla varma objekt utsänder strålning, vars våglängd och intensitet beror av ytans temperatur. Glödtråden i en glödlampa har t ex en temperatur på ca 2000 °C och utsänder synligt ljus. Ett svalare objekt, såsom en människa, sänder ut strålning med våglängd runt 10 µm, infraröd strålning. Intensiteten hos strålningen beror på temperaturen och på ytans emissivitet, ϵ . ϵ är ett mått på ytans förmåga att emittera strålning. En kropp med $\epsilon=100\%$ kallas en svart kropp, den absorberar all strålning som faller in emot den och reflekterar inget. Motsatsen är en perfekt spegel, som har $\epsilon=0\%$. De flesta material ligger någonstans däremellan. Material som återfinns i naturen, t ex vegetation, trä, hud och målarfärg har ofta $\epsilon=90-95\%$, dvs de är ganska svartkroppslika. För signaturanpassning i IR-området av varma objekt försöker man sänka ytans emissivitet. Då ytan betraktas i en värmekamera kommer den att se kallare ut än den verkligen är.



Figur 2: Genom att sänka emissiviteten till 63 % strålar en 50°C yta lika mycket som en 20°C med hög emissivitet (100%)

Ett material med hög emissivitet vid låg temperatur och låg emissivitet vid hög temperatur skulle ge låg kontrast mot bakgrunden vid alla temperaturer, utan att någon yttre styrning av ytan vore nödvändig. Inom projektet har vi studerat material för att åstadkomma en sådan yta.

Solgel-framställning av VO₂-filmer och effekten av dopning med W och Re

En kategori material som är intressant för dynamisk anpassning av ytors optiska egenskaper är termokroma material, dvs. sådana vars färg eller reflektans är temperaturberoende. Ett exempel på sådant material är Vanadindioxid (VO₂), som genomgår en fasomvandling från halvledande till metalliskt vid en temperatur omkring 68°C (fasövergångstemperaturen, T_f). Dock sker ingen större färgförändring av VO₂ inom det synliga området, men inom IR-området förändras det från hög till låg transmission eller från låg till hög reflektion, då temperaturen passerar T_f . Denna fasomvandling åtföljs inte bara av optiska förändringar utan även elektriska (förändrad ledningsförmåga) och magnetiska.

En framställningsmetod av VO₂ genom s.k. solgel-teknik har tidigare tagits fram inom ett annat projekt för tillämnningar inom laserskydd. Uppvärmning med fokuserad laserstråle kunde då snabbt värma upp materialet över T_f och blockera laserljus. I detta projekt är vi emellertid mer intresserade av att uppnå fasomvandling vid lägre temperaturer, t.ex. de som råder då solljus värmer upp en skrovyta eller uppvärmning från en motor. Det är emellertid sedan tidigare känt att man kan reducera (eller öka) T_f genom att dopa VO₂. Enligt litteraturen är det mest vanligt att dopa med volframjoner (W), där en typisk applikation är inom smarta beläggningar av fönsterglas för energibesparing. Enligt litteraturen är det också känt att ju högre oxidationstalet är hos katjonerna desto större blir reduktionen av omslagspunkten. Därför var det även motiverat att pröva dopning med (rhenium) Re för vilken oxidationstalet som mest är 7+ medan det för W är 6+. Dessutom är W och Re grannar i det periodiska systemet, vilket tyder på att de bör ge liknande effekt vid dopning.

Syntes av VO_2 enligt tidigare utvecklad metod och dopning därav med W och Re gjordes inom ramen av ett examensarbete och resultaten finns beskrivna i C. Moffatt och A. Wigsteins arbete⁶. Vi summerar här några av de viktigaste resultaten. Både dopade och odopade vanadin-lösningar applicerades på kiselsubstrat med spinbeläggningsteknik, dvs. genom att substratet snabbt (2000 rpm) roterar under ca 30 s efter det att lösning har tillförts ytan. Innan en VO_2 -film bildas måste lösningsmedel från lösningen avdunsta, följt av en värmebehandling vid 525°C i $\text{Ar}(\text{H}_2)$ -atmosfär under 2,5 timmar för att reducera V_2O_5 , som ursprungligen finns i lösningen, till VO_2 . Den resulterande filmen karakteriserades sedan på olika sätt för att bedöma dess kvalitet och effekten av dopning. Renheten av filmen kan bedömas genom s.k. röntgendiffraktion för att t.ex. identifiera olika föroreningar eller oxidationsfaser av vanadinoxid. De optiska egenskaperna, reflektion och transmission, studerades med FTIR-spektroskopi (FTIR = FourierTransform InfraRöd) tillsammans med en provhållare med vilken temperaturen kunde varieras inom ca $13\text{--}100^\circ\text{C}$.

Odopade VO_2 -filmer uppvisade som väntat en fasövergångstemperatur runt 68°C , där filmtransmittansen under T_f var ca 80-90 % och över T_f ca 5 %, mätt vid våglängden $4\text{ }\mu\text{m}$. Genom W-dopning kunde T_f sänkas som mest ned till 22°C , genom att tillsätta 4 atom% W. En nackdel som dock uppkommer vid dopningen är att omslagsdynamiken minskar, dvs. skillnaden i transmittans eller reflektans mellan metallisk och halvledande fas. För den mest dopade filmen nästan halverades transmittansen jämfört med odopat VO_2 under T_f , medan dopning ökade transmissionen till drygt 30 % över T_f . Omslagsdynamikens försämring var inte lika allvarlig för lägre dopningskoncentrationer om ca 1 atom%. Dopning med Re misslyckades då det inte gav någon förändring av T_f . Det kan finnas flera förklaring till detta, varav en förklaring är att Re inte kunde tillföras till VO_2 -filmen pga. att stabila föreningar av Re bildades, som transporterades bort från filmen av gasflödet under värmebehandlingen.

Lågemissiv maskeringsfärg: Samarbetsprojekt med PvTT

Ett projektsamarbete mellan FOI och Finska PvTT (Finnish Defence Forces Technical Research Centre) pågick under 2000-2004 i syfte att utveckla en lågemissiv maskeringsfärg för det termiska infraröda (IR) våglängdsområdet, utan att förlora önskade visuella färgegenskaper. Projektsamarbetet ingick i ett s.k. MoU mellan försvarsforskningsinstituterna i Danmark, Norge, Finland och Sverige. Här ska vi kortfattat redogöra för de viktigaste resultaten inom samarbetet, vilket är mera utförligt beskrivet i en slutrapport⁷.

Grundförutsättningen för att lyckas i detta arbete var att ta fram en kombination av pigment, bindemedel och tilläggsmiddel, dvs en färg, där själva bindemedlet (inklusive tilläggsmiddel) har hög IR-transmission och pigmentet hög IR-reflektion. En sådan färg är lågemissiv inom IR-området (dvs. termiskt lågstrålände) och hindrar mer eller mindre värmestrålningen från att emitteras från en uppvärmd yta, med detta färgskikt ytterst mot omgivningen. Färgskiktets emittans måste dock slutligen anpassas till ett visst objekts typiska yttemperatur och en typbakgrund för att ge bra termiskt kamouflage mot IR-sensorer. Dessutom måste ett annat (troligtvis ej samma) pigment i färgen ge lämplig visuell maskering. Här har vi använt färgpigment som PvTT sedan tidigare hade erfarenhet av i utvecklingsarbetet av andra maskeringsfärger. Under projektsamarbetet har arbetet varit uppdelat på så sätt att FOI har utvecklat olika typer av IR-reflekterande pigment medan PvTT har tagit fram lämpligt bindemedel och färgpigment samt blandat färg och applicerat på provytor. Färgskikt, bindemedel och pigment har karakteriserats hos både FOI och PvTT.

Som en grundregel har alla metaller hög IR-reflektion, så metallflagor eller pulver därav är lämpliga IR-pigment, såsom aluminium, koppar, silver och guld. En blank och jämn metallyta reflekterar ca 98 % av ljuset, vilket innebär att den termiska utstrålningen är mycket låg. Om däremot ytan är skrovlig så minskar reflektansen (ökar emissiviteten) vilket även gäller för ett metallpulver, där

reflektansen bl.a. påverkas av partikelstorleken. Nackdelen med metaller är att de även har hög visuell reflektion, vilket inte är speciellt gynnsamt för maskering pga. solblänkrisken. Med olika metoder har vi dock minskat den visuella reflektionen hos IR-pigmenten, bl.a. genom olika ytbeläggningar såsom t.ex. silversulfid på silverpulver och aluminiumoxid-hydroxid på aluminiumflager. Kravet på dessa beläggningar är att de är tillräckligt tunna för att transmitta den långvågiga IR-strålningen men tillräckligt tjocka för att absorbera synligt ljus.

En annan metod är att utnyttja s.k. tunnfilmsinterferens genom att tillverka flagor av kvartsvåglängdstunna skikt, hos vilka synligt ljus absorberas och IR-strålning reflekteras. Med en liknande metod framställer man antireflexbehandling för optiklinser. I vårt fall har vi tillverkat flagor med växelvisa skikt av guld och titan, för vilka vi fick hög reflektion ($>80\%$) över ca $1\text{ }\mu\text{m}$ våglängd och låg reflektion ($<20\%$) för kortare våglängder. Ytterligare en metod går ut på att använda pulver av kisel, där hög IR-reflektion skapas genom bakåtspridning av ljuset på liknande sätt som socker eller salt ser vitt ut, trots att enskilda korn är genomskinliga. För kiselpulver uppkommer denna "vithet" inom IR-området där kisel har hög IR-transmission och skillnaden i brytningsindex är stor mellan luft och kisel, vilket ger hög reflektion. Däremot absorberas synligt ljus (våglängder under $1\text{ }\mu\text{m}$) i kisel pga. dess s.k. bandgap, vilket effektivt tar bort alla reflexer inom det synliga området.

Vi har även tagit fram en typ av lättviktspigment som kan vara användbart för t.ex. flygplan. Denna är baserad på s.k. cenosfärer, bestående av ihåliga keramiska partiklar. Dessa har täckts med olika metaller genom diverse ytbeläggningsmetoder. Ett färgskikt med metallbelagda cenosfärer blir starkt spridande vilket minskar ytans glansighet.



Figur 3: Exempel på lågemissiv grön färg med aluminiumflager som IR-reflekterande pigment

Som bindemedel har vi använt en vattenlöslig akrylat-polymer från BASF med en relativt god IR-transmission inom IR-området, med den kraftigaste absorptionen inom $8\text{--}9\text{ }\mu\text{m}$. Tilläggsmiddel adderas till bindemedlet för att förbättra färgens egenskaper, bl.a. beträffande sprickbildning, skumbildning och antikorrosionsförmåga. Färg med de ovan nämnda IR-reflekterande pigmenten har karakteriserats beträffande reflektans och emissivitet. Som ett mål skulle färgens emissivitet ligga som högst inom $0,4\text{--}0,6$ inom våglängdsintervallen $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ och $8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$ för att vara godkänd, eller reflektansen inom $60\text{--}40\%$. Dock var det bara färg med aluminiumbaserade IR-pigment som uppnådde detta mål. Som bäst erhöles reflektansen $60\text{--}65\%$ ($\varepsilon = 0,4$) inom $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ och ca 50% ($\varepsilon = 0,5$) inom $8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$. Det finns dock ingen slutlig förklaring till varför övriga IR-reflekterande pigment, som i sig hade hög reflektans, inte kunde frambringa en tillräckligt lågemissiv färg. En förklaring kan vara att aluminium är omgiven av en mycket stabil oxid som kan hindra kemisk reaktion med bindemedlet, medan övriga pigment drabbas av en beläggning som bredbandigt absorberar inom IR. Andra typer av bindemedel kan möjligtvis motverka detta, vilket dock inte kunde lösas inom detta projektsamarbete.

Radartransmissionsmätningar inom 8-12 GHz genom färgskikt med bl.a. aluminiumflagor på plexiglassubstrat påvisade en relativt hög transmission, > 70 %. Detta innebär att radarabsorberande material kan målas med denna lågmissiva färg utan att nämnvärt försämra radaregenskaperna.

Pigment med potential att styra de optiska egenskaperna hos en yta

Vid arbetet med att utveckla ytor där man kan styra den elektromagnetiska utstrålningen från ytan i syfte att reducera risken för upptäckt är det viktigt att tänka på hur en sådan yta ska tillverkas. Ett smidigt sätt är att utveckla färger med önskade optiska egenskaper, som ska kunna målas eller sprayas på en yta.

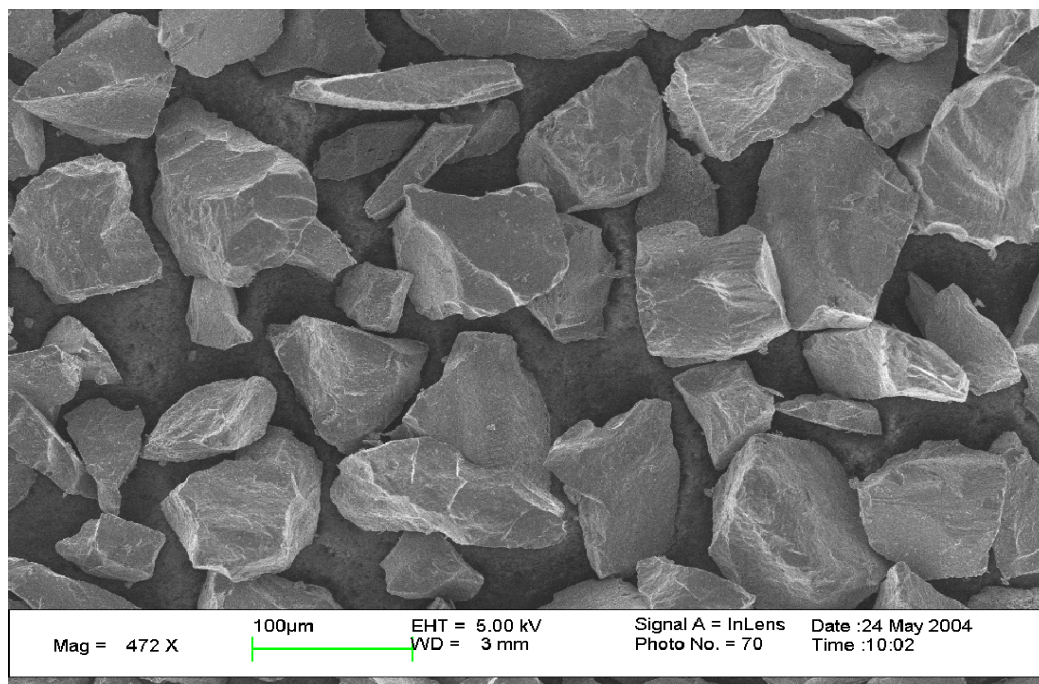
Förenklat består färg, som används för att appliceras på en yta, av pigment som ger önskad reflektion (kulör), bindemedel som dels binder samman pigmenten och dels ger fäste till underlaget. I de flesta fall finns även ett lösningsmedel tillsatt för att ge önskad konsistens.

Färger används i olika sammanhang för att ge ytor önskade egenskaper

- Reducera uppvärmning genom solstrålning.
- Reducera risken för detektion genom att minska utstrålningen av synliga och infraröda våglängder.
- Maximal absorption av solstrålning men minimal återemission av värmestrålning.

Elektromagnetisk strålning, som faller in mot en yta, kan antingen reflekteras i ytan, transmittas genom den eller absorberas av materialet. För de flesta ytor är det frågan om en kombination av dessa tre.

Reflektionen av strålning från en målad yta bestäms framförallt av brytningsindex, partikelstorleken samt formen på de ingående pigmenten. I vårt arbete har vi undersökt och beskrivit de optiska egenskaperna hos tre olika kategorier av pigment (halvledande, isolerande och ledande material). Pigmentens fysikaliska morfologi och storlek bestämdes med hjälp av svepelektronmikroskopi.



Figur 4: Exempel på en svepelektronmikroskopbild på 100µm stora kiselpigment

De optiska egenskaperna, i form av diffus reflektion, karaktäriserades med hjälp av två spektrometrar vilka arbetar i olika våglängdsområden, resultaten är presenterade i en rapport.⁸

Syftet med arbetet var att ta reda på hur olika faktorer påverkar de optiska egenskaperna hos pigment. Denna kunskap ger oss möjligheten att på bästa sätt designa en yta med önskade egenskaper vad gäller reflektion/absorption.

Signaturreduktion med fotonkristaller

Inledning och historik

Fotonkristall är ett nytt begrepp inom den moderna fotoniken, som kan sägas innebära en generalisering av optiska gitter. Det är sålunda en periodisk struktur av minst två medier, i det typiska fallet ett högbrytande dielektrikum och luft. Periodlängden i strukturen skall vara ungefär som våglängden för den elektromagnetiska våg man önskar påverka. Ett förbjudet frekvensintervall - *fotonbandgap* - kan uppträda i en fotonkristall. Det medför att ljus med frekvens inom ett sådant gap inte transmitteras genom fotonkristallen, utan reflekteras i ytan. En sådan yta har $\epsilon=0\%$ och emitterar därför ingen strålning i det aktuella frekvensintervallet. Detta är grunden för FOI:s arbete med fotonkristaller, som avser praktiska möjligheter till signaturanpassning i det termiska IR-området med hjälp av periodiska fotonstrukturer.

Fotonkristaller ger en ny möjlighet att *selektivt* undertrycka den termiska emissionen inom ett väl definierat våglängdsområde. Ett uppenbart val är därvid endera av de två termiska fönstren: 3-5 μm och 8-12 μm . Selektiv signaturreduktion är fördelaktig, eftersom den i mindre grad minskar objektets strålningskylning, och dessutom medger goda egenskaper i det visuella området. Det senare i motsats till en blank metallyta, som bredbandigt undertrycker praktiskt taget all termisk emission.

Tidigare verksamhet vid FOA/FOI har inriktats på att selektivt undertrycka den termiska emissionen i det övre termiska fönstret, dvs 8-13 μm . På 90-talet bedömdes det primära spaningshotet från IR-sensorer finnas i detta våglängdsområde, som inkluderar svartkroppsstrålning med hög intensitet för måttligt varma objekt: 10-100 °C. Under denna period identifierades ett antal kandidatmaterial, t ex berylliumoxid, kiselkarbid, kiseldioxid och bornitrid, med vilka den termiska emissionen i det övre fönstret till större eller mindre del kan undertryckas. Den breda översikt över olika kandidatmaterial som vi då gjorde, gav då också det negativa resultatet att det med all sannolikhet inte finns något enstaka material som undertrycker emissionen i det nedre fönstret 3-5 μm . Denna svaghet accentuerades av den snabba parallella utvecklingen av hotsensorer för detta kortvågiga fönster.

Det aktuella projektet

Mot bakgrund av det växande spaningshotet i det nedre atmosfäriska fönstret formulerades det nu aktuella konceptet: En beläggning som är selektivt undertryckande i *båda* de termiska IR-fönstren. Grundtanken är att utnyttja något av de material som i bulkform reducerar utstrålningen i det övre fönstret, och ge detta en sådan periodisk struktur att ett fotonbandgap undertrycker den termiska utstrålningen i det nedre gapet. Detta koncept har patenterats och innehas f n av FOI⁹.

Fotonbandgapberäkningar

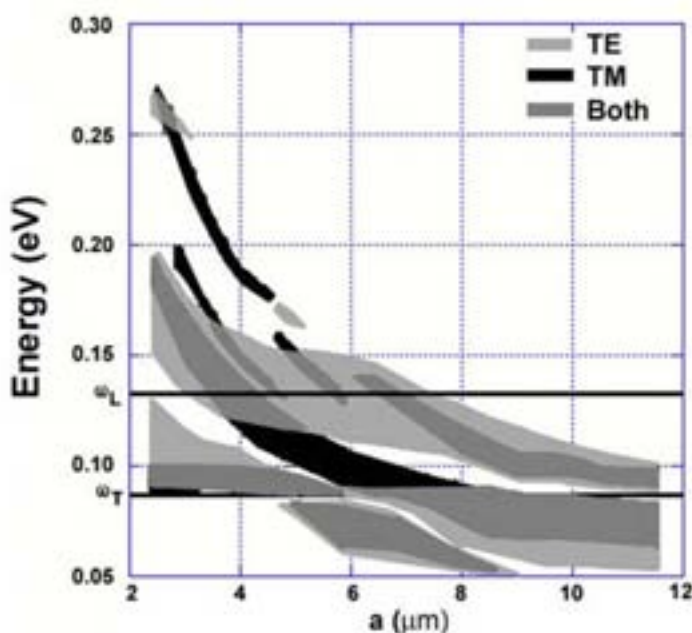
Mycket få, och endast teoretiska, grundläggande studier som behandlade denna kombination av material- och strukturelaterade fotongap, hade utförts när projektet inleddes. Andreas Rung har, finansierat av FOI, disputerat på en avhandling¹⁰ som ligger inom detta område. Två frågeställningar, som båda är relevanta för signaturanpassning, har stått i fokus för Rungs arbete:

1) *Hur tjock måste en fotonkristall vara för att ge tillräckligt stor reduktion av den termiska utstrålningen?*

Detta har undersökts i ett antal modellfall⁸ och i första hand kan resultaten sägas vara uppmuntrande. En beläggning med ca 50 μm tjocklek visar sig kunna ge en tekniskt värdefull reduktion av signaturen i båda de atmosfäriska fönstren. Ett visst förbehåll måste göras för vinkeleffekter, dvs emittansreduktionen kan vara väsentligt mindre i stora vinklar från normalen. Det kräver ytterligare undersökningar för att avgöra om reduktionen inträffar vid så stora vinklar att det är taktiskt ointressant.

2) *Hur växelverkar de två slagen av bandgap när de ligger våglängdsmässigt nära varandra?*

Denna mycket grundläggande fråga var inte besvarad när projektet inleddes. Ett antal delvis förvånande delresultat har framkommit ur de fotonbandberäkningar som gjorts inom ramen för Rungs avhandlingsarbete. För den aktuella tillämpningen finns det anledning att betona att våra resultat bekräftar det koncept vi bearbetat. Det finns inga grundläggande invändningar mot tanken att kombinera material och fotongap enligt ovan. Vid sidan av detta har vi funnit att med speciella arrangemang kan de båda gapen både fås att förstärka och försvaga varandra^{11 12}. En översikt ges i figuren nedan. Den visar effekten av att styra positionen av de två olika polarisationernas fotongap till närheten av materialgapet, som är stationärt¹³. Styrningen av det förstnämnda görs m h a perioden a , vilken som synes är jämförbar med våglängden hos den aktuella IR-strålningen.



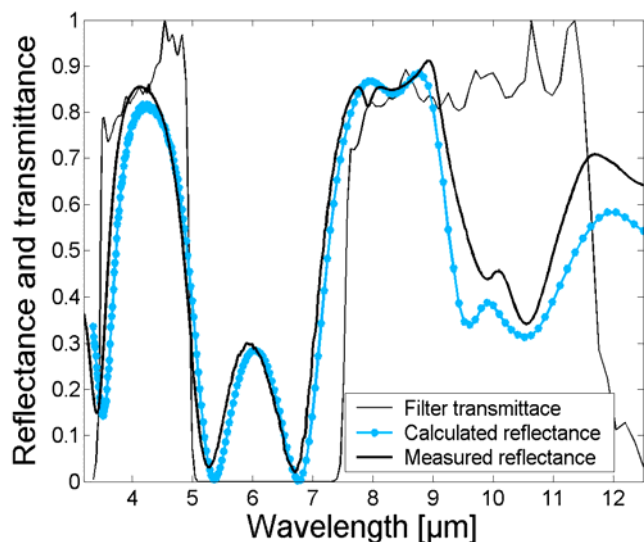
Figur 5: De mellangråa zonerna markerar områden som är gynnsamma för signaturreduktion i och med att de betecknar gap för båda polarisationsriktningarna

Experimentella resultat - 1 D

Under de senaste åren har aktiviteten utvidgats genom att en andra doktorand: Herman Högström rekryterats för att experimentellt verifiera och studera växelverkan mellan de två typerna av gap. Ekonomiskt har detta varit möjligt genom stöd från Vetenskapsrådet, Uppsala universitet och Forsvarsmaktens Nanoteknikprogram.

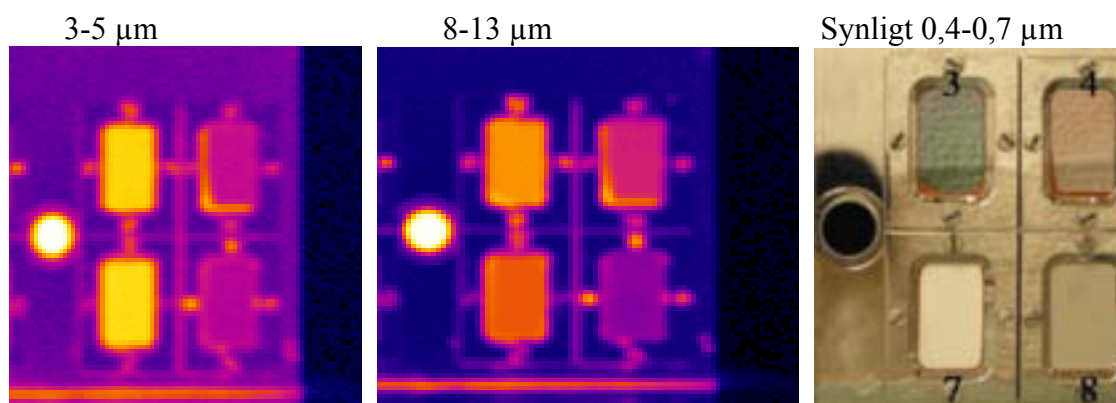
Våren 2004 presenterade Högström sin teknologie licentiatexamen som behandlade endimensionella fotonkristaller, dvs optiska multilager, avsedda för signaturreduktion i båda de atmosfäriska fönstren.

De ingående materialen var kiseldioxid, SiO_2 och kisel, Si, vilka båda kan deponeras från gasfas med s k CVD-teknik. Metoden användes inom halvledarindustrin, är väl etablerad, och har visat sig kunna kontrolleras med god noggrannhet även vid storskalig tillverkning. I nedanstående diagram visas reflektansspektra för det enkla fallet med ett Si/ SiO_2 dubbellager på ett Si-substrat¹⁴.



Figur 6: Önskad, beräknad och uppmätt reflektans för signaturyta

Den goda överensstämmelsen mellan beräknat och experimentellt reflektansspektrum visar att provtillverkningen är välkontrollerad. Resultaten visar att kombinationen av de två materialen ger ett tydliga reflektansmaxima, dvs emittansreduktion, i både 3-5 och 8-13 μm -fönstret. I det övre fönstret noterade vi en bonuseffekt i det avseendet att maximum blev avsevärt bredare än för enbart SiO_2 -materialet. Detta är med andra ord ett fall där "materialgapet" förstärkts. I diagrammet ovan finns även ett transmittansspektrum för filtret i den värmekamera som använts för att mer direkt registrera signaturreduktionen. Nedan visas två värmebilder som tagits med denna, en för vardera av de två IR-fönstren:



Figur 7: Fyra prover vid 50 °C, fotograferade i olika våglängdsområden

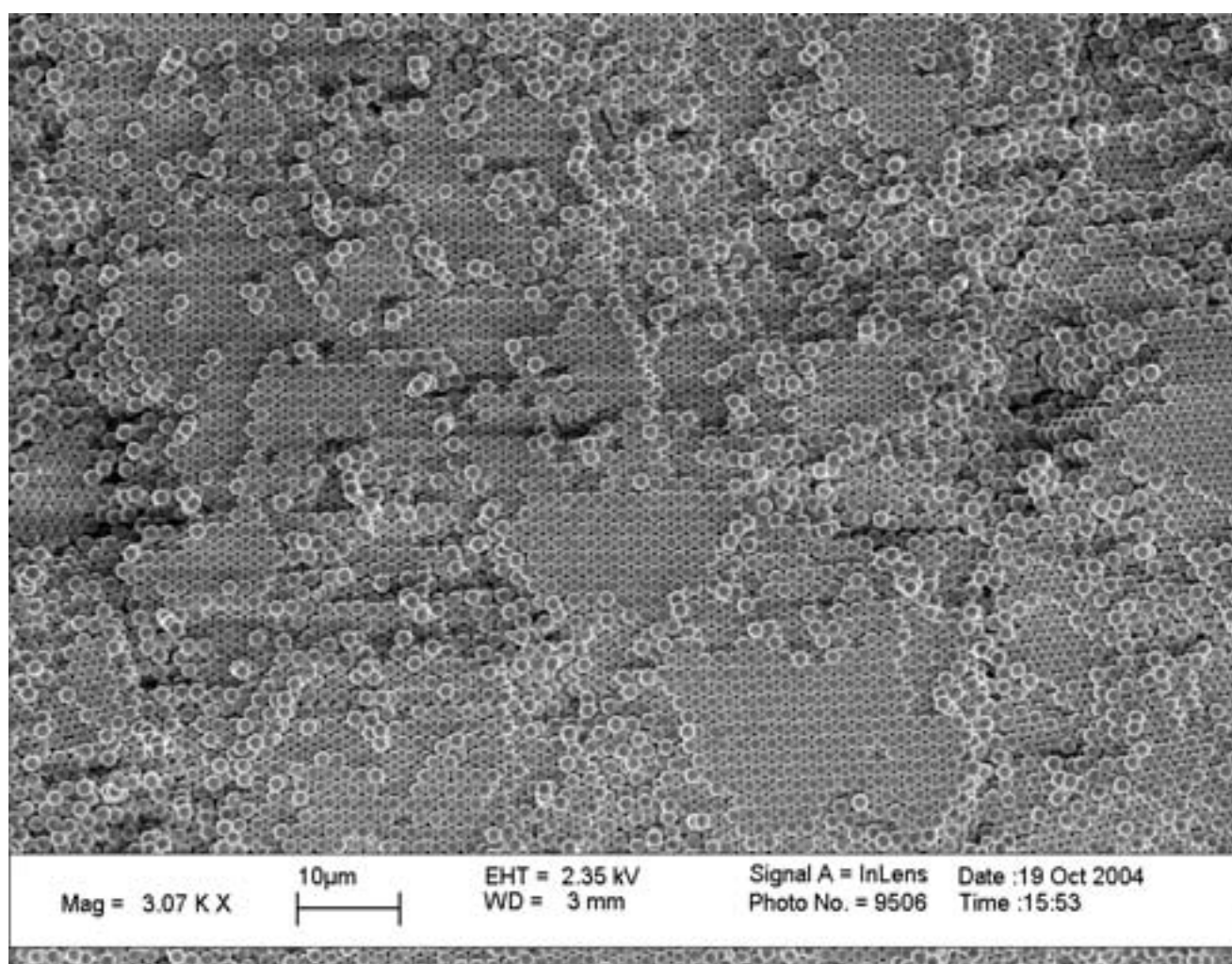
Färgskalan är sådan att en ljusare kulör motsvarar högre emittans, och den vita fläcken till vänster i de båda bilderna användes som empirisk svartkropp. Proverna i den övre raden är de nämnda multilagren från vänster SiO_2/Si resp $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}$. I den nedre raden finns till vänster berylliumoxid och till höger aluminium¹². Aluminium är som sagt lågemitterande i båda fallen, men visuellt

oacceptabelt. Berylliumoxid är bra endast i det övre fönstret (8-12 μm), under det att SiO_2/Si – kombinationen, vars spektrum gavs i föregående figur, är lågemitterande i båda fallen.

Vi anser ovanstående resultat lovande, och en näraliggande tillämpning skulle i detta fall vara som pigment i en lågemitterande färg. Prestanda blir sämre för en sådan färg med separata pigmentkorn, än för ett sammanhängande multilager, och valet av bindemedel är ett problem, men samtidig signaturdämpning i båda fönstren skulle innebära ett avsevärt tekniskt framsteg.

Experimentella resultat - 3 D

Under det senaste året har vi även tillverkat tredimensionella prover av SiO_2 -sfärer i luft. Den metod vi använt är långsam sedimentering i vätskebad. Under gynnsamma omständigheter bildas då en ordnad Opalstruktur, som därefter kan torkas och bilda en fotonkristall av SiO_2 och luft. Detta framgår av nedanstående mikroskopbild på sedimenterade SiO_2 -sfärer med diametern 1.6 μm .

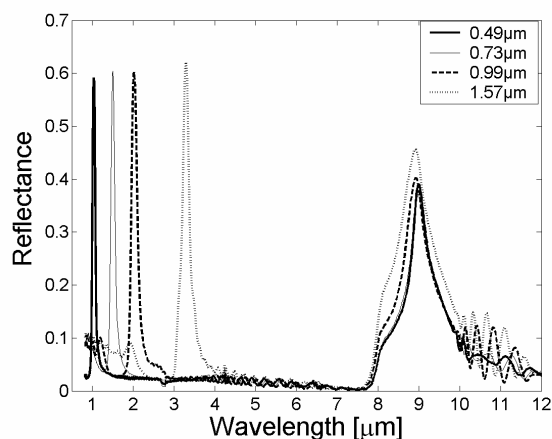


Figur 8: Svepelekronmikroskopbild föreställande fotonkristall

Bilden visar relativt stora ytor som är periodiskt välordnade: "kristalliter", åtskilda av "korngränser" med klart ordning. Denna sedimenteringsmetod för tillverkning av fotonkristaller i laboratorieskala har utvecklats sedan 90-talet, och är nu allmänt utnyttjad. Den har även använts för att göra inversa strukturer. Det sedimenterade provet, i detta fall av polymersfärer, utnyttjas därvid som "gjutform". I ett andra steg fylls denna med en lämplig vätska, t ex en solgel, som får bilda en fast fas.

Polymersfärerna förgasas vid måttligt hög temperatur, så att endast den inversa strukturen i det andra materialet – ofta en oxid - återstår.

I nedanstående figur återges reflektansspektra för fyra prover med SiO₂-sfärer, med angivna diametrar, bildande en opalstruktur i luft. En analys av resultaten visar övertygande att de skarpa maxima vid korta våglängder, som härrör från strukturens fotonbandgap, uppträder vid en våglängd som beror linjärt av sfärdiametrarna, vilka i sin tur bestämmer kristallens gitterkonstant. Den breda materialrelaterade reflektanstoppnen kring våglängden 9 μm är däremot oberoende av periodlängden.

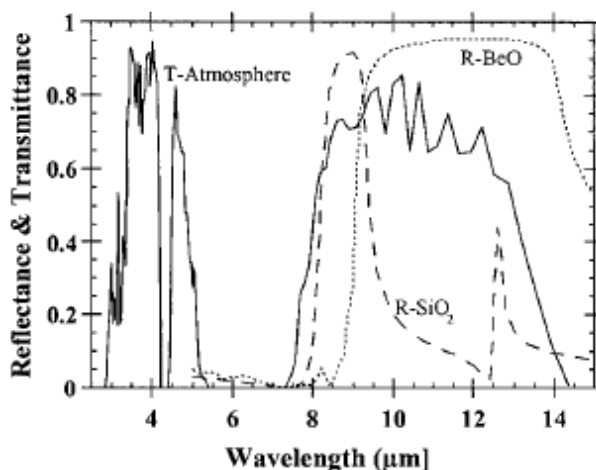


Figur 9: Visar tydligt hur strukturgapet flyttar sig med sfärdiametern medan materialgapet ligger kvar vid 9 μm

Dessa resultat är citerade från ett ännu inte accepterat manuskript, och såvitt vi känner till är dessa de första resultat som visar på det samtidiga uppträdandet av struktur- och materialrelaterat gap – dvs ett slutgiltigt verifierande av dubbelt selektiv signaturreduktion m h a fotonstrukturer. Det är å andra sidan i detta skede tveksamt hur näraliggande ett storskaligt utnyttjande av sedimenterade fotonkristaller kan tänkas vara. Även i detta fall vore en tillverkning av pigment det mest realistiska. 3D-pigment skulle komma att uppvisa mindre vinkelberoende signaturreduktion. Storskalig sedimentering av ordnade strukturer är emellertid fortfarande oprövat, och kan komma att medföra stora svårigheter.

Fotonkristaller av berylliumoxid

Motivationen bakom arbetet att ta fram en fotonisk struktur av berylliumoxid är möjligheten att skräddarsy emittansen i båda atmosfäriska transmissionfönstren som finns i det termiska IR-området. Ett pigment som bygger på detta skulle med andra ord ha en designad emittanskurva där MW och LW är låg emitterande, dvs. ger inte ifrån sig någon röjande strålning även om objektet är varmt, medan resten av våglängdsområdet kan emittera strålning. Ett objekt med ett sådant pigment på ytan kan därmed göra sig av med överskottsvärme. Konceptet med att använda sig av ett material med fotonbandgapstruktur och ett materialrelaterat bandgap, sk. reststråleband, har beskrivits i förra kapitlet. Detta gjordes med hjälp av en struktur av växelvis kisel och kiseldioxid (Figur 6). Denna struktur gav då upphov till låg emittans i våglängdsområdet 3-5 μm och i 7-10 μm på grund av kiseldioxidens reststråleband. Även om kiseldioxid har ett reststråleband i LW så täcker den inte hela LW 8-12 μm . Berylliumoxids reststråleband har en bättre täckning då det spänner över området 9-15 μm , se Figur 10. Därför var det intressant att undersöka om man kan åstadkomma en liknande struktur med berylliumoxid.



Figur 10: Transmission kurvan för atmosfären (heldragen) reflektans kurvan för kiseldioxid (streckad) och berylliumoxid (prickad)¹⁴

Dessutom ville vi med detta arbete åstadkomma en fotonbandgapsstruktur som var verksam i tre dimensioner. Valet blev att göra en syntetisk invers opal. Opaler är ädelstenar som är uppbyggda av mikrokulor ordnade i tre dimensioner. Inversen av en sådan struktur är ”kulor” av luft ordnade i en matris av solitt material. I vårt fall skulle det solida materialet vara berylliumoxid. För att producera detta används polymera mikrokulor av storlek 1,587 μm som ordnades i en vätskecell. Därefter infiltrerades denna av en berylliumalkoxid (en förening av beryllium med en organisk ligand) löst i en alkohol. (Denna berylliumalkoxid var vi tvungna att tillverka eftersom den inte går att köpa kommersiellt.) En process utvecklades som utgick från metalliskt beryllium, butylalkohol och metylkvicksilver. Vid upphettning övergår alkoxiden till oxid och den höga temperaturen (450°C) bränner bort de polymera mikrokulorna vilket resultera i sfäriska hålrum i berylliumoxid.

Den resulterande kristallen av invers opalin berylliumoxid visade att det går att producera pigment med designad emittanskurva. Dessutom överensstämde emittanskurvan väl med de modellberäkningar som gjordes i samband med detta arbete¹⁵. Detta skulle i ett militärt sammanhang betyda att signaturanpassning av objekt kan göras avsevärt mycket bättre i hotvåglängderna i det termiska IR-området utan att ytan blir onödigt isolerande och därmed förvärrar problemet med att avleda värmet. En annan fördel är att ett keramiskt material som berylliumoxid är radartransparent, vilket betyder att den termiska signaturanpassningen kan appliceras ovanpå ett radarreducerande skikt.

Dock ska det tilläggas att kvalitén på kristallen var låg och att den tillverkningsmetod som användes inte lämpar sig för storskalig produktion. Därmed behövs det en betydande arbetsinsats innan en fälmässig signaturanpassning baserad på denna teknik kan förverkligas.

Material för höga temperaturer

Höga temperaturer, uppemot 1000 °C förekommer t ex i utlopp från flygmotorer. Att signaturanpassa dessa utgör ett svårt men för våra flygfarkosters överlevnad synnerligen viktigt problem. En så varm yta ger en mycket kraftig svartkroppsstrålning även om emissiviteten är tämligen låg. Man försöker skärma av heta ytor, så att en robots målsökare inte ska se rakt in i motorn, men även skärmen blir då varm. Att samtidigt signaturanpassa i radarområdet är en ännu större utmaning, men nödvändigt eftersom vi i en framtida stridssituation kan tänkas möta både IR- och radarmålsökarrobotar.

Radarabsorberande material för höga temperaturer

Högtemperatur radarabsorberande material (HT-RAM) behövs där låg radarsignatur erfordras vid höga temperaturer till exempel vid utloppen till flygframdrivningssystem. Behovet av radarabsorberande material för höga temperaturer är stort hos existerande system och kommer att bli ännu större i framtiden.

Med tanke på applikationsområdet ställer man en rad krav på HT-RAM. Materialet ska:

- Ha god lastbärande förmåga
- Ha låg specifik vikt
- Klara temperaturer upp till 1000°C
- Vara radarabsorberande

För att uppfylla dessa krav behövs det ett kompositmaterial som kan bestå av ett matrismaterial med armeringsfibrer för ökad lastbärande förmåga och tillsatser med förluster som ger radarabsorberande egenskaper.

Matrismaterial

Matrismaterial behöver ha hög hållfasthet och tål höga temperaturer men det behöver inte vara radarabsorberande i sig. Bland alla material som används som matrismaterial idag är det bara keramer som både klarar höga temperaturer och har hög hållfasthet.

Ur radarabsorptionssynpunkt är det fördelaktigt om matrisen har låg dielektricitetskonstant för att undvika reflektion vid ytan. De flesta keramer har en ganska hög dielektricitetskonstant vilken också är temperaturberoende. Högre temperaturer medför större värde på dielektricitetskonstanten. Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) används ofta som matrismaterial vid höga temperaturer och har en dielektricitetskonstant på 6,6 vid rumstemperatur och 7,5 vid 1000°C.

Ett sätt att minska materialets dielektricitetskonstant är att införa porer i materialet (Figur 11). Porösa keramer kan framställas på ett flertal olika sätt. Till exempel kan man använda plastsfärer som porformande substrat, infiltration av porösa förförmor (till exempel natursvamp) samt jäsning med kemiska metoder.



Figur 11: Exempel på en porös mullit-matris

Tillsatser med förluster

Tillsatser med förluster ska stå för radarabsorption hos kompositen och behöver klara höga temperaturer med tanke på användningsområdet, men också med tanke på de höga temperaturer som används vid materialframställning.

Som tillsatser med förluster använder man oftast partiklar och/eller fibrer med konduktiva och magnetiska förluster. Användning av nanopartiklar och nanofibrer kan vara till fördel. En utmaning här är höga temperaturer som avsevärt begränsar urvalet. För att klara höga temperaturer är det fortfarande keramer som är aktuella här. Bland dem är det ferriter och halvledande keramer som är mest intressanta som förlustmaterial. Ferriter är keramer, metalloxider, med magnetiska förluster.

Absorptionsegenskaperna hos ferriterna är möjliga att variera inom stora frekvensområden. Genom att använda ferriter som har absorptionsegenskaper inom olika frekvensband kan man få bredbandiga absorbenter.

Ferritmaterial är möjliga att använda vid höga temperaturer så länge som temperaturen ligger under Curie – temperaturen. Över denna temperatur försämras absorptionsegenskaperna avsevärt även om de mekaniska egenskaperna bibehålls till betydligt högre temperatur. Tyvärr ligger Curie – temperaturen vid ca 600°C för flertalet spineller och vid ca 500°C för hexagonala ferriter. Därför är användbarheten för ferriter som förlustmaterial vid högre temperaturer begränsad i dagsläget.

I halvledande material är antalet ledande elektroner starkt beroende av temperaturen. Vid högre temperaturer får materialet en tillräcklig ledningsförmåga för att kunna absorbera mikrovågsstrålning. Dopningstillsatser medför stora förändringar i absorptionen, till exempel kan absorptionen hos SiC öka avsevärt om karbiden är dopad, till exempel med B, P eller N.

Halvledande keramer i form av partiklar (nanopartiklar) och/eller fibrer (nanofibrer) skulle kunna användas som förlustmaterial i kompositen. Ett stort antal faktorer, till exempel ledningsförmåga, partikelgeometri, volymfyllnadsgrad och agglomerering har betydelse för kompositens förlustegenskaper.

Alla nämnda förlustmaterial kan användas var för sig eller i en kombination av två eller flera. En kombination är fördelaktig i den mening att det ger flera frihetsgrader för att få en bredbandig absorbent.

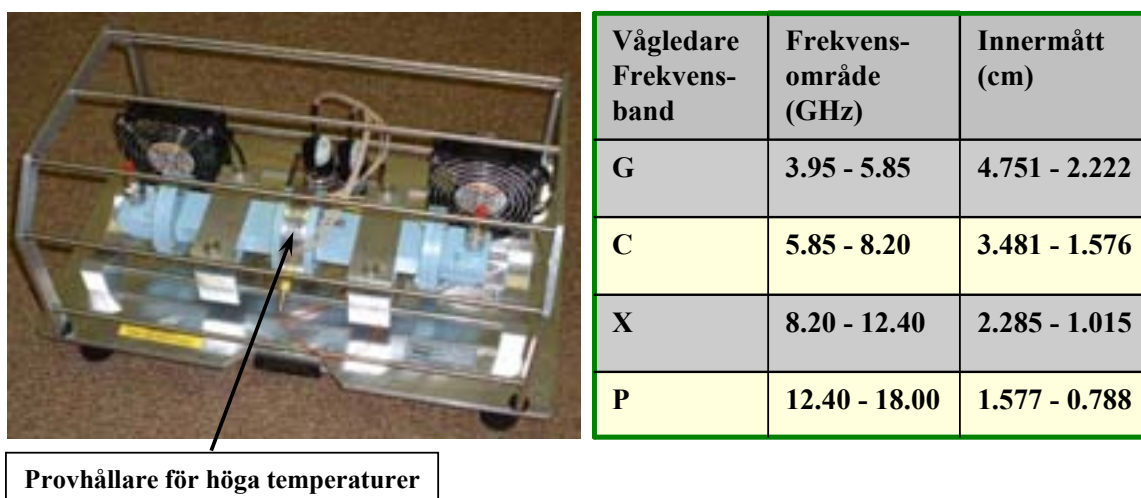
Armeringsfibrer

Armeringsfibrer i form av långfibrer används i första hand för ökad hållfasthet. För höga temperaturer används keramiska fibrer som redan finns utvecklade hos olika tillverkare. Bland dem finns till exempel Nextel™ fibrer (Al_2O_3) från 3M Inc.¹⁶ som är dielektriska och Tyranno® fibrer (Si-Ti-C-O) från UBE Industries¹⁷ som har konduktiva förluster och kan användas även för att förbättra radarabsorberande egenskaper hos kompositen.

Korta fibrer, t.ex. nanofibrer, kan även de förbättra hållfasthetsförmågan hos kompositen.

Materialmätningar vid höga temperaturer

HiTEMP™ universal plattform system för vågledare har inskaffats inom projektet från Damaskos Inc. i USA¹⁸. Plattformen (Figur 12) ger möjlighet att genomföra transmissions- och reflektionsmätningar i vågledare för fasta material vid temperaturer upp till 200°C.



Figur 12: HiTEMP™ universal plattform system för vågledare från Damaskos Inc. i USA

Det kompletta systemet består av HiTEMP™ universalplattform, kalibreringsstandard, adaptrar för vågledare, provhållare för höga temperaturer med värmekroppar, termoelement, digital termometer och strömförsörjningsaggregat. Provhållarna är utformade som en del av transmissionslinjen samtidigt som det är möjligt att dela på och klämma ihop hållarna för att lätt kunna byta prover. De är också speciellt designade för att minimera effekter som leder till mätfel vid höga temperaturer när man använder vanliga vågledarkomponenter.

HiTEMP™ universalplattform är designad för att användas tillsammans med konventionellt tillgängliga vågledare för olika frekvensband: G, C, X, P (Figur 12, tabell). Instrumentkontroll och databearbetning genomförs med hjälp av programmet MU-EPSLN™ (också från Damaskoc Inc.) vilket ger möjlighet att jämföra materialegenskaper vid olika temperaturer.

Mikrovågsegenskaper för berylliumoxid

Berylliumoxid (BeO , Beryllia) är en unik oxid bland alla oxider på grund av att den kombinerar utmärkta elektriskt isolerande egenskaper med hög värmeledningsförmåga. Den är också korrosionsbeständig. Berylliumoxidpulver är högt toxiskt vid inandning. Detta och de höga kostnaderna för råmaterialet begränsar betydligt användning av berylliumoxid i såna applikationer där man skulle ha stor nytta av materialets unika egenskaper.

Berylliumoxid framställs från mineraler som finns i naturen, beryl och betrandit. Den produceras i pulverform genom den termiska nedbrytningsprocessen av $\text{Be}(\text{OH})_2$. Pulvret är kommersiellt

tillgängligt med renhet över 99 %. Komponenter av BeO produceras genom de vanliga framställningsmetoderna som pressning, slamgjutning eller strängsprutning av pulver. Sintring genomförs vid temperaturer 1600-1800°C.

Ett av de mest kända företag som producerar och säljer Beryllia är ett engelskt företag *Goodfellow*¹⁹, som har över 50 års erfarenhet av att jobba med Berylliumoxid. Från detta företag köptes ett antal prover av olika storlekar för vågledarmätningar i syfte att undersöka materialets mikrovågsegenskaper vid höga temperaturer. Proverna har en renhet på 99,5 % och porositet 0 % som man får genom varmpressning i grafitformar.

Elektriska egenskaper hos berylliumoxid

Berylliumoxid är ett dielektriskt material och tillhör den grupp av keramer som har lägre permittivitet, dvs reell del $\epsilon_r' < 15$.

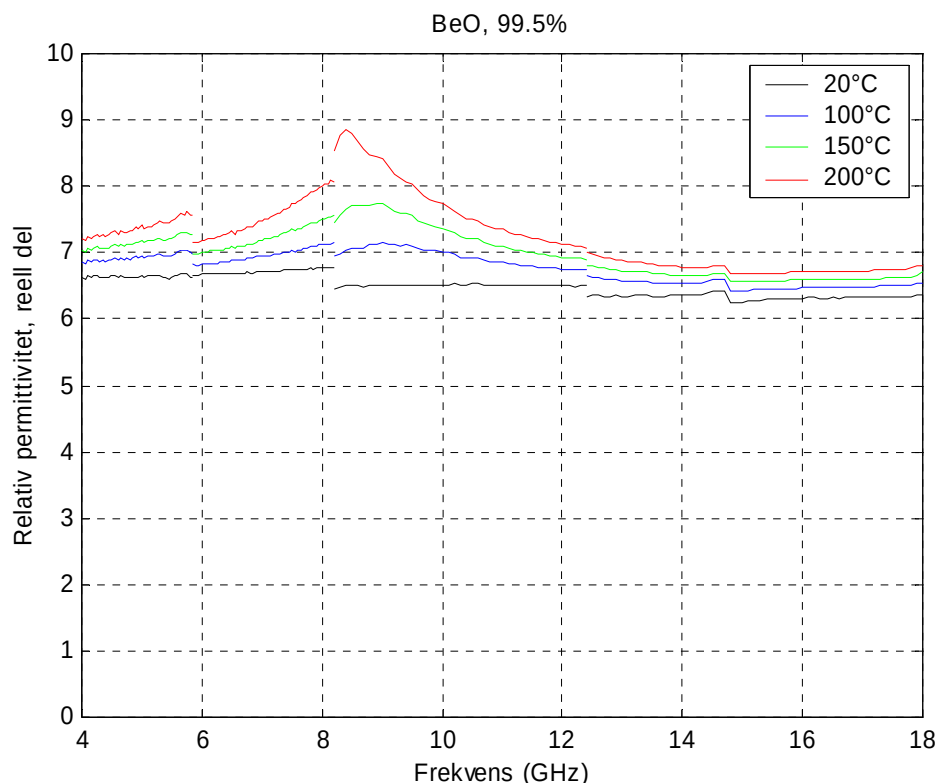
Goodfellow uppger följande elektriska egenskaper hos sina beryllia prover:

Dielektrisk hållfasthet	10-14 kV mm ⁻¹
Inre resistivitet vid 25°C	$> 10^{14} \Omega\text{cm}$
Dielektricitetskonstanten	6,5-7,5

Det nämns inte vid vilken temperatur eller frekvens dielektricitetskonstanten är uppmätt. Vanligtvis gäller det rumstemperatur och frekvensen 1 MHz. Det är också okänt vad som händer med dielektricitetskonstanten vid högre temperaturer. Genomförd litteraturundersökning visade samma resultat.

För att undersöka berylliumoxids mikrovågsegenskaper vid höga temperaturer genomfördes en rad vågledarmätningar vid rumstemperatur och högre temperaturer: 100°C, 150°C och 200°C. För detta ändamål användes HiTEMP™ universalplattformssystemet för vågledare från Damaskos Inc. vilket beskrivits tidigare (Figur 12). Utrusningen ger möjlighet att mäta materialegenskaper i frekvensområdet mellan 3,95 och 18 GHz vilket täcks med hjälp av 4 stycken vågledare (Figur 12, tabell).

Resultat av genomförda mätningar presenteras här nedan i Figur 13.



Figur 13: Relativ permittivitet, reell del ϵ_r' , hos berylliumoxid, 99.5%

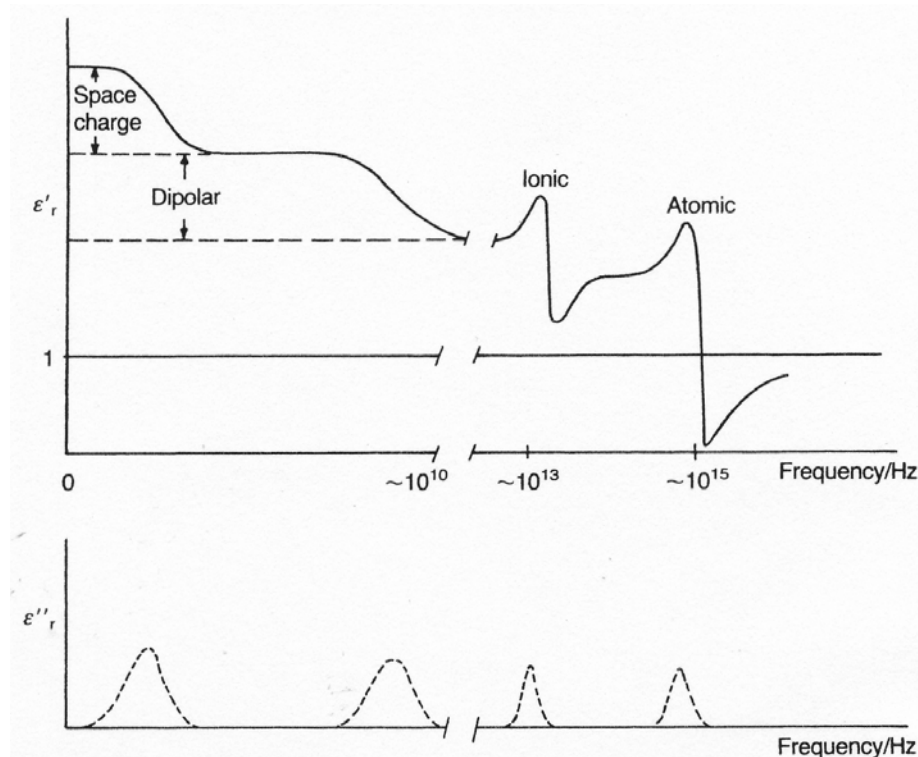
Vid rumtemperatur ligger permittiviteten, reell del, vid ca 6,5 vilket överensstämmer med värdet som uppges av *Goodfellow*. Man kan också konstatera att permittiviteten ökar med temperaturen. En intressant effekt ser man i frekvensområdet mellan 8 och 9 GHz vid högre temperaturer. Vad som händer med materialet och materialegenskaperna vid de höga temperaturerna är svårt att säga i det här stadiet och flera undersökningar borde genomföras.

När ett dielektriskt material, som till exempel berylliumoxid (BeO), befinner sig i ett elektriskt fält blir materialet polariserat. Detta händer via ett antal olika polarisationsprocesser.

- 1) Elektronisk polarisering händer i alla material och är en liten förskjutning av elektroner i en atom i relation till kärnan.
- 2) Polarisering av joner är en liten förskjutning av katjon- och anjon-gitter i relation till varandra.
- 3) Orienteringspolarisering sker i material med polära molekyler, som till exempel vatten, där de slumpmässigt orienterade molekylerna orienteras i ett pålagt elektriskt fält.
- 4) Gränsytepolarisering är en process där det sker en begränsad transport av laddningsbärare under påverkan av ett elektriskt fält och koncentration av dem vid potentialbarriärer som till exempel vakanser, korngränser och föroreningar.

Alla polarisationsprocesser uppträder i materialet vid speciella frekvenser (Figur 14).

Orienteringspolarisering är den viktigaste förlustmekanismen för permittiviteten i mikrovågsområdet.



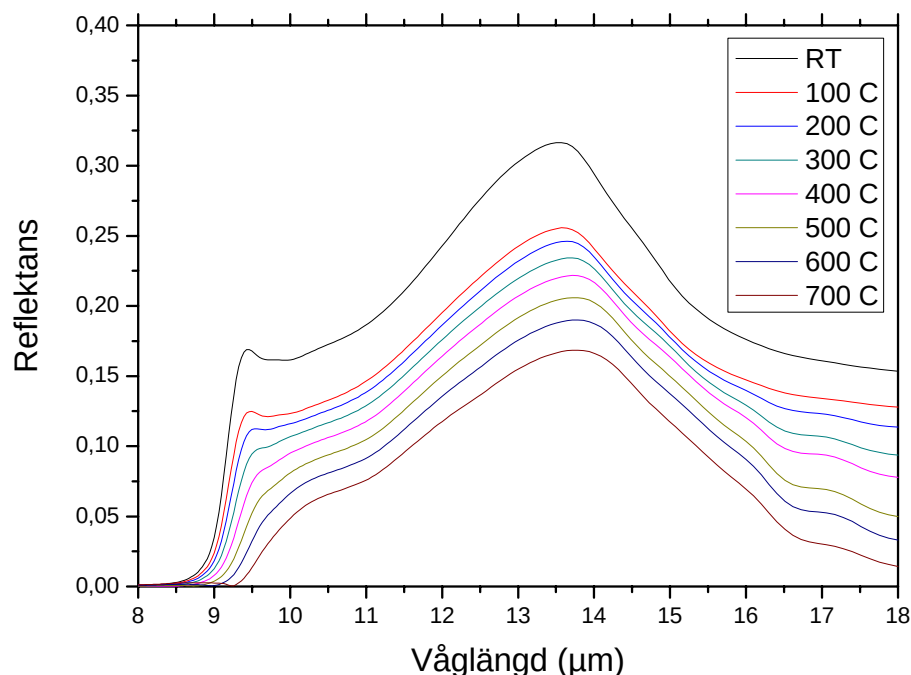
Figur 14: Ändring av permittivitet, reell del ϵ'_r och imaginär del ϵ''_r , med frekvensen

Polarisationsprocesser leder till energiförluster som direkt påverkar dielektricitetskonstanten, dvs. permittiviteten. Polarisering av joner och elektronisk polarisering är resonansprocesser och är oberoende av temperaturen. Gränsytelpolarisering och orienteringspolarisering är relaxationsprocesser och är starkt temperaturberoende. Förmodligen är det just de här effekterna som vi ser i Figur 13.

IR-egenskaper hos berylliumoxid vid höga temperaturer

Såsom tidigare har påpekats har berylliumoxid (BeO) intressanta optiska egenskaper inom atmosfärens transmissionsfönster 8-12 μm , med ett reflektansmaximum (s.k. reststråleband) som kraftigt sänker ytans emissivitet. Tidigare rapporter har visat att emissiviteten hos polykristallint BeO är ca. 0,05-0,2 inom 9,5-14 μm , för olika betraktelsevinklar inom (0-75°) mot ytnormalen vid 150°C²⁰. Här presenterar vi mätresultat av reflektans vid olika temperaturer mellan rumstemperatur (RT, ca 23°C) och 700°C.

Mätningarna gjordes i IR-området inom våglängdsintervallet 2-20 μm med en Bruker IFS55 Fouriertransform infraröd- (FTIR) spektrometer utrustad med en högtemperaturmätcell från Specac Ltd. Mätcellen kan mäta transmission och reflektion vid temperaturer upp till 800°C och vid förhöjt gastryck upp till 1000 psi (70 bar). För mätningar över ca 750°C måste dock cellen evakueras, vilket inte gjordes i detta fall utan utfördes i torr luft vid normalt atmosfärstryck. Reflektansmätningar kan endast utföras spekulärt, dvs utan att kunna mäta diffust reflekterat ljus. BeO-materialet erhöles via Goodfellow Cambridge Ltd och var av 99,5 % renhet i form av en 13 mm i diameter skiva med 1 mm tjocklek, dvs samma material som användes för mikrovågsmätningarna.



Figur 15: Reflektansspektrum för BeO vid olika temperaturer mellan rumstemperatur och 700°C

Reflektansspektrum för BeO ges i Figur 15. Reflektansen är uppmätt med en plan guldtyta som referens [med reflektans omkring 98 %]. Signifikant för mätresultaten är en relativt kraftig minskning av reflektansen, vid reflektansmaximum (ca 13,5 μm) med nära 50 % mellan RT och 700°C. Vid en jämförelse med tidigare resultat¹⁹ är reflektansen här betydligt lägre, ca 0,25 mot ca 0,9 (emissiviteten 0,1) för tidigare mätningar vid 150°C. Eftersom tidigare mätresultat även inkluderar diffust reflekterat ljus via en mätning av emissiviteten skulle en förklaring vara att ljuset från provytan i stor utsträckning är diffust och att vi vid en spekulär reflektansmätning bara detekterar en del av det reflekterade ljuset. De intressanta resultaten i denna rapport är dock temperaturberoendet hos reflektansen. BeO har länge varit ett intressant lågemissivt material för att sänka den termiska utstrålningen, bl.a. i högttemperaturlämpningar.

Slutsatsen vi härmed kan dra är ett visst ifrågasättande av BeO som lågemissivt material för högttemperaturlämpningar, då materialets reflektans vid högre temperaturer minskar relativt kraftigt (dvs emissiviteten ökar). Ytterligare mätningar, där man även mäter det spridda ljuset eller eventuellt använder provytor av ren spekulär reflektanskaraktär, bör dock utföras för att bekräfta detta temperaturberoende.

Depolariserande ytor

Under ett antal år har polarisationseffekter inom IR-området studerats vid FOI^{21, 22, 23, 24}. Problemställningen har varit att använda polarisationseffekter för att förbättra kontrast mellan mål och bakgrund. Bakgrunder är i allmänhet opolariserade, medan objekt som tillverkats av människor ofta har släta ytor, med olika reflektansvärden för olika polarisationsriktningar. Därmed kan en polarisationskontrast erhållas mellan bakgrund och objekt om polarisationstillståndet hos den, mot detektorn, infallande strålningen beräknas. Exempel på polarisationstillstånd (parametrar) är, ”grad av lineär polarisation”, (Degree of Linear Polarization, DoLP) och Theta, som beskriver orienteringen av den depolariserande ytan.

Även det motsatta problemet är intressant att behandla. Hur skall man skydda sig om objektet är utsatt för spaning eller följning med en polarisationssensor? Ett sätt att skydda ett objekt kan vara att utforma objektets ytor, så att de är depolariserande. Därmed blir polarisationskontrasten liten och risken för upptäckt blir låg. Detta kan erhållas genom att göra ytorna skrovliga. Graden av skrovlighet bestämmer graden av depolarisation. Det är också viktigt att skillnaden mellan den totala värmeutstrålningen, (dvs emissiviteten mätt utan polarisator) från objektet och från bakgrunden är liten så att kontrasten är liten (liten temperaturskillnad). Detta innebär ofta att minska emissiviteten från objektet och det kan göras genom att öka ytans reflektans.

Det är alltså intressant att finna ytor som depolariserar emitterad strålning och för vilka man också kan välja den totala emitterade strålningen. För att erhålla dessa egenskaper har använts keramiska ihåliga sfärer s.k. cenosfärer.

Mätutrustningens egenskaper har tidigare rapporterats i artiklar^{21, 22, 23}. Speciellt har polarisationsmätningar på cenosfärer tidigare rapporterats i två artiklar^{22, 23}. Cenosfärsytorna konstruerades genom att fästa ett bindemedel på ett substrat och pudra bindemedlet med cenosfärer av en given storleksfördelning. Cenosfärerna fastnade vid bindemedlet och bildade en skrovlig yta. Genom att förånga guld på cenosfärerna under strykande infall erhålles en delvis täckning av guld. Genom att förånga flera gånger under strykande infall från olika riktningar kan man få olika grader av guldtäckning av cenosfärerna. Därmed kan emissiviteten hos ytan varieras med bibehållen depolarisation. Exempel på mätningar på prover med fyra olika täckningsgrader visas i Figur 17, högra bilden. Kurvorna visar emissivitet som funktion av emissionsvinkel för cenosfärsytor med partikelfördelning mellan 63 och 80 μm . Kurvskarorna visar cenosfärsytor utan guldtäckning och sedan med ökande grad av täckning. Inom varje kurvskara finns kurvor för horisontell, vertikal och 45° polarisationsriktning. I en första approximation kan sägas att DoLP är skillnaden mellan emissiviteten i horisontell och vertikal polarisationsriktning. Kurvorna visar att DoLP är liten vilket innebär att ytorna är starkt depolariserande.

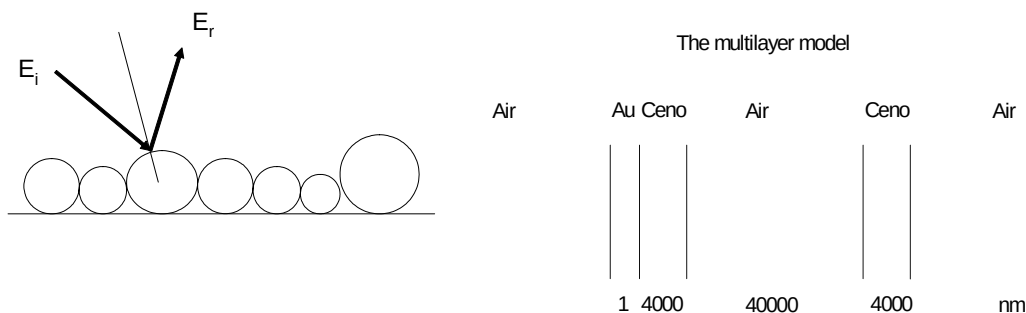
En enkel tvådimensionell modell har konstruerats för att kunna jämföras med mätningarna beskrivna ovan²⁵. Modellen är en tvådimensionell optisk geometrisk modell. I modellen framställs cenosfärsytan som en serie cirklar placerade på en slät yta. Ytan belyses med strålning av våglängden 10 μm . Modellen kan separeras i två delar där den ena beskriver strålföljningen och den andra beräknar reflektansen mot ytan för den cenosfär som träffas av strålningen.

Strålföljningen görs med en Monte Carlo-metod som visas i Figur 16, vänstra bilden. Läget där strålningen träffar cenosfärsytan bestäms med en slumpgenerator.

För att beräkna reflektansen mot ytan måste ett antal antaganden göras:

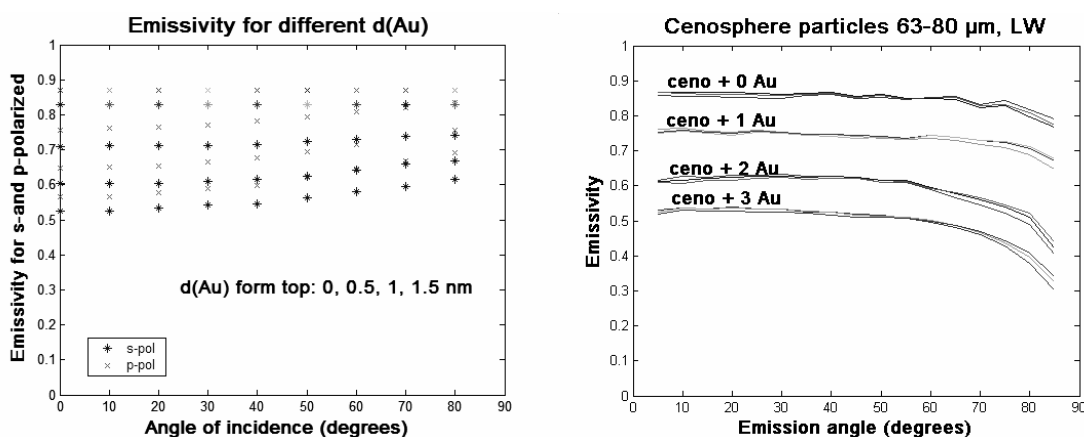
- Den reflekterande ytan kan approximeras med en multilagerstruktur av släta ytor med oändlig utsträckning.
- Ytornas skrovlighet är mycket liten
- Lagren i cenosfären är homogena med väldefinierad dielektricitetsfunktion ϵ och magnetisk permeabilitetsfunktion μ .

Med dessa antaganden är det möjligt att beräkna reflektansen med standardmetoder för beräkning av multilagerstrukturer. Modellen för att beräkna reflektansen mot ytan visas i Figur 16, högra bilden.



Figur 16: (Till vänster) Tvådimensionella geometrin för en cenosfärsyta med infallande och reflekterande strålningen (Till höger) Geometrin för den aktuella modellens multilagerstruktur

Resultatet av modellberäkningarna för olika guldlager visas i Figur 17, vänstra bilden. Emissiviteten beräknas från den, genom modellen, framräknade reflektansen, genom formeln: emissiviteten = 1 - reflektansen. I figuren visas emissiviteten för s- och p- polariserad strålning som funktion av infallande vinkel. En jämförelse mellan modellen och mätningarna (vänstra och högra bilden i Figur 17) visar en god överensstämmelse.



Figur 17: Emissiviteten för olika tjocklekar på guld för modellen till vänster och mätningar till höger

Som sammanfattning kan sägas att genom att använda Monte-Carlo-beräkningar på en enkel tvådimensionell geometrisk modell har god överensstämmelse erhållits vid en jämförelse med mätningar på cenosfärsytorna. Modellberäkningarna kunde reproducera följande egenskaper:

- Depolarisation inträffade
- Emissivitetsnivån kunde ändras genom att ändra tjockleken på guldlagret
- Emissivitetsnivån överensstämde bra med mätningarna.

Som slutsats kan sägas att denna enkla tvådimensionella modell var förvånansvärt bra.

Radarabsorbenter och radarsignaturer

Moderna militära objekt utformas för att försvåra upptäckt och identifiering, målföljning och bekämpning. Detta förutsätter kännedom om de krav som ställs av uppdragen som är planerade för ifrågavarande objekt. De hot en speciell typ av uppdrag förväntas möta måste först definieras: typen av radar, frekvenser, polarisation, rumslig belägenhet och detekteringsavstånd. Genom signaturanpassning är det vanligen ökad överlevnadsförmåga och taktisk effektivitet man önskar uppnå.

För luftfarkoster är den mest kritiska hotsektorn den framifrån inom specificerade intervall i azimuth och elevation. Bakifrånsektorn och sidsektorn med på liknande sätt specificerade vinkelintervall är också viktiga, men kanske i mindre grad. Figuren nedan visar "Pegasus", en UCAV av Northrop Grumman, som kännetecknas av sin utpräglade drakform med kraftigt bakåtsvepta vingframkanter och markant framåtsvepta bakkanter. I avsaknad av absorbentmaterial skulle en vingkant kunna generera exceptionellt stora monostatiska radarekon i en smal azimuthsektor. För en belysande radar skulle emellertid sådana ekon uppträda mycket kortvarigt på grund av planets relativa rörelse. Pegasus form genererar helt obetydliga monostatiska radarmålytor i hotsektorerna, sådana de kan beräknas med hjälp av fysikalisk eller geometrisk optik.



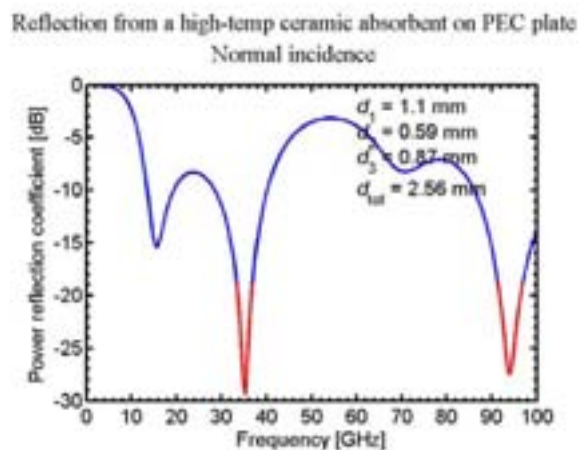
Figur 18: UCAV-N X-47A "Pegasus" (Northrop Grumman)

En viktig uppgift för radarabsorberande material (RAM) på luftfarkoster är att reducera bidrag till målytor från t.ex. kantdiffraktion och ytvågsdiffraktion, vilka inte kan förutsägas med hjälp av optiska beräkningsmetoder. Diffraktion från kaviteter behöver också optimeras för att minska målytan. En grundläggande uppgift för RAM vid allmänna tillämpningar är att reducera återspridning från vinkelrätt belysta ytor. Den tekniska utvecklingen av radar mot såväl lägre frekvenser som bredare frekvensband måste mötas av motsvarande utveckling på absorbentsidan. Härtill kommer de multispektrala aspekterna av multisensorhot samt vikt- och miljökrav.

Optimering av flerskiktsabsorbenter

I projektet har metoder för att optimera flerskiktsabsorbenter vidareutvecklats. Resultatet har blivit en algoritm, som är ovillkorligt stabil för alla värden på elektromagnetiska materialparametrar och skiktjocklekar. En global optimeringsmetod (*Differential Evolution Method*) utvecklad av Storn och Price (1997)²⁶ används som optimeringsalgoritm. Metodiken kan med fördel också tillämpas på radarabsorberande strukturer (RAS), dvs. lastbärande strukturer som integrerar RAM.

Studier har visat att optimering kan bibringa en flerskiktsabsorbent prestanda som vida överträffar möjligheterna för de enskilda skiktmaterialen. Som exempel på en optimerad design visas i figuren nedan reflektansen hos en keramisk högtemperaturabsorbent, optimerad i frekvensbanden 33–37 GHz och 91–97 GHz. Absorbenten, applicerad på en perfekt ledande platta, består av tre tunna keramiskt där den väsentliga absorptionen sker i mitskiktet.

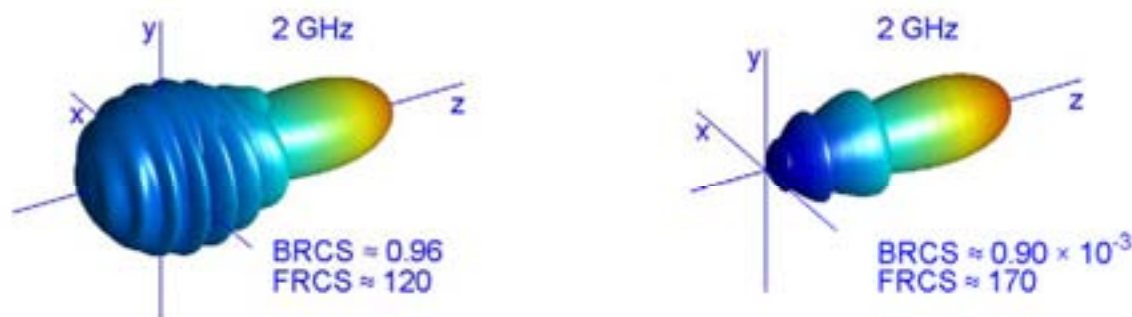


Figur 19: Reflektans hos optimerad högtemperaturkeram

Bistatisk spridning

Möjligheten att detektera mål med hjälp av bistatisk eller multistatisk radar har undersökts genom teoretisk analys av spridningen i alla riktningar av infallande vågor mot ett geometriskt enkelt mål i tidigare FOI-projekt²⁷. Dessa modeller har nu utvecklats ytterligare. Målet har varit en metallsfär eller metalldcylinder, bar eller belagd med ett tunt skikt av en homogen radarabsorbent. Exakta lösningar av spridningsproblemet visar att en tillräckligt effektiv radarabsorbent i hög grad kan eliminera spridningen i hela återspridningshalvrymden. Däremot kan spridningen i en sektor omkring framåtspridningsriktningen inte alls undertryckas. Denna framåtspridningssektor är möjlig att utnyttja för detektering med hjälp av ett bi- eller multistatiskt radarsystem.

Spridningsegenskaperna hos ett perfekt ledande objekt och samma objekt klätt med en effektiv radarabsorbent illustreras i de båda tredimensionella diagrammen nedan. Dessa åskådliggör den bistatiska radarmålytan hos en perfekt ledande sfär (av diametern 50 cm) belyst av en plan våg från vänster i z-axelns riktning. Avståndet från koordinatsystemets origo till diagrammens yta är ett logaritmiskt mått på radartvårsnittets storlek. BRCS och FRCS betecknar radartvårsnitten i respektive bakåt- och framåtspridning.



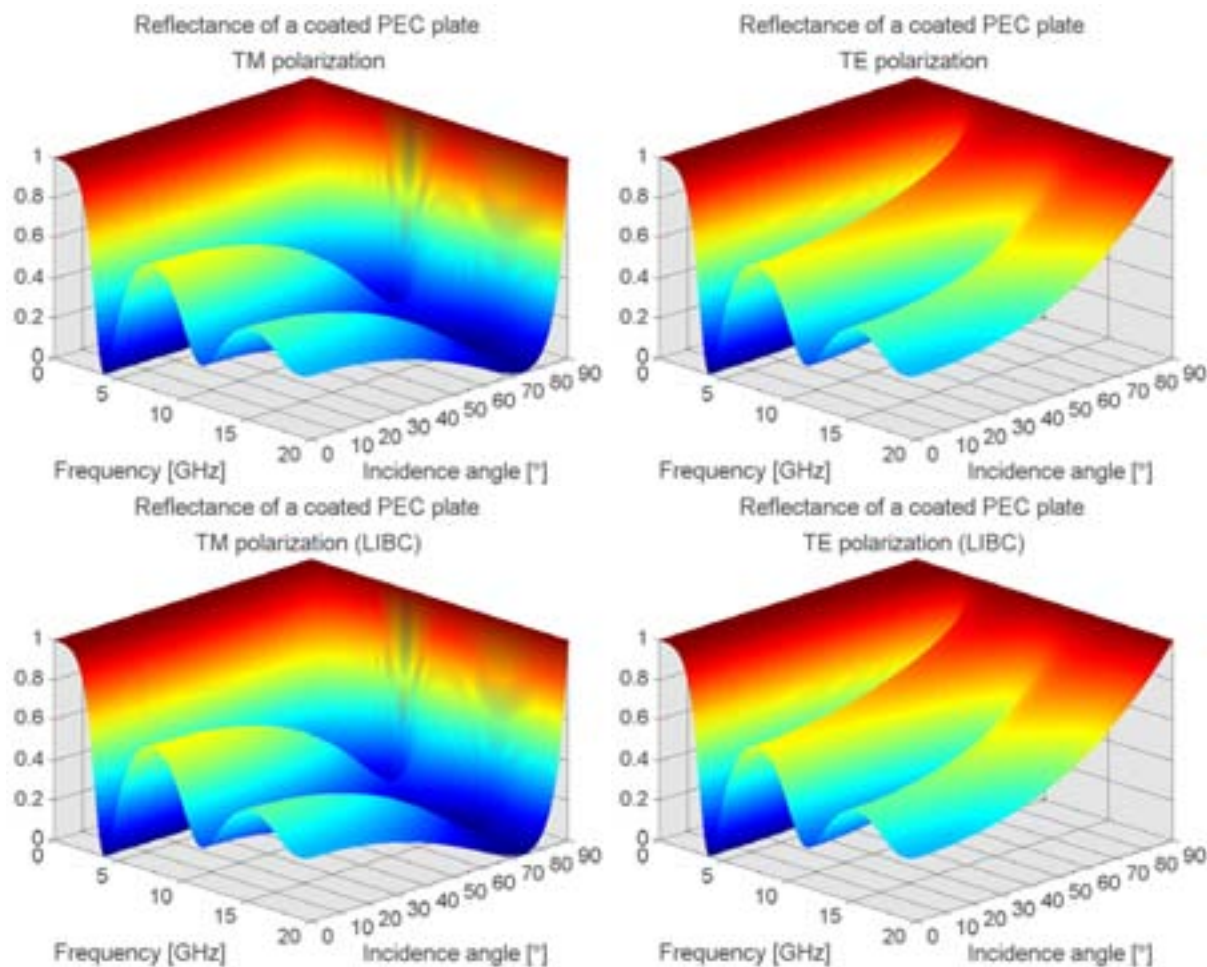
Figur 20: Bistatisk radarmålyta hos en perfekt ledande sfär av diametern 50 cm, bar (vänster) eller försedd med en effektiv radarabsorbent (höger)

I optiska sammanhang är stark framåtspridning ett i hög grad välkänt fenomen. Alla som kört bil i riktning mot en lågtstående sol vet att detta kan vara en bländande upplevelse, även om tak eller solskydd avskärmar den direkta solstrålningen. Orsaken är framåtspridning från partiklar i luften eller på vindrutan.

Impedansrandvillkor

Noggrann beräkning av radarmålytor kräver att ekvationslösare för Maxwells ekvationer utnyttjas. Tyvärr är sådana ekvationslösare synnerligen beräkningskrävande. Optikbaserade beräkningsmetoder erbjuder dess bättre tillräckligt goda alternativ för många tillämpningar. I den mån radarabsorbenter ingår i objektstrukturen ökar dock problemets komplexitet avsevärt. Impedansrandvillkor erbjuder emellertid en tilltalande möjlighet att reducera komplexiteten. Impedansrandvillkor skall ses som en självständig form av matematisk absorbentmodell som ersätter de sedvanliga randvillkoren för en perfekt ledande begränsningsyta. Sålunda modelleras absorbenten på ett mindre resurskrävande vis till priset av en något lite grövre approximation. Det skulle innebära ett betydande framsteg om en metodik togs fram för modellering av givna radarabsorbenter i form av impedansrandvillkor som säkerställer noggrannheten vid signaturberäkningar.

En preliminär undersökning illustrerar de möjligheter som står till buds. Figuren nedan visar reflektansen hos en perfekt ledande platta belagd med ett homogent skikt av ett dielektriskt RAM. En snett infallande våg belyser plattan i transversellt magnetisk (TM) polarisation, vänster, eller transversellt elektrisk (TE) polarisation, höger. De båda övre figurerna visar de exakt beräknade resultaten, medan de båda undre visar resultaten när absorbenten har ersatts med impedansrandvillkor applicerade på den perfekt ledande plattan. Här har den allra enklaste typen av randvillkor använts, s.k. Leontovitch-randvillkor. Likväl är det svårt för ett oöppnat öga att notera de skillnader som finns mellan de exakta och de approximativa lösningarna.



Figur 21: Reflektans hos en absorbentförsedd perfekt ledande platta vid TM och TE polarisation av infallande våg. Övre figurer gäller exakt lösning, nedre approximation av absorbenten med hjälp av impedansrandvillkor

Magnetodielektriska radarabsorbenter

Teoretiska analyser av absorbentstrukturer har visat att det gynnsammaste sättet att åstadkomma bredbandigt effektiva radarabsorbenter är att utnyttja magnetodielektriska material som en eller flera komponenter i absorbentstrukturen. Vidare har det framkommit att absorbenters polarisationsegenskaper kan styras effektivt med hjälp av magnetodielektriska material. Det senare är i hög grad kopplat till möjligheterna att absorbera kryptvågor på krökta ytor och är för den skull av speciellt värde för flygtillämpningar. Figuren ovan utgör likaledes en god illustration till oförmågan hos ett rent dielektriskt RAM att absorbera snett infallande vågor i TE-polarisation. Med ett magnetodielektriskt material i absorbenten skulle möjligheterna att styra absorptionens polarisationsberoende avsevärt kunna förbättras. Det är t.ex. möjligt, åtminstone teoretiskt, att åstadkomma effektiva radarabsorbenter med så gott som polarisationsberoende absorptionsförmåga och därmed polarisationsberoende kryptvågsabsorption; ej illustrerat här.

Avancerade partikelkompositer

Metamaterial, eller artificiella funktionella material, förekommer i praktiken oftast i form av kompositer bestående av ett dielektriskt värdmaterial, eller matris, och ett eller flera slag av partiklar av en eller flera storleksfraktioner. Metamaterial karakteriseras elektromagnetiskt med hjälp av (komplexvärda) effektivvärden för den dielektriska permittiviteten, ϵ , och den magnetiska permeabiliteten, μ . För att teoretiskt beräkna dessa storheters effektivvärden används s.k. blandningsteorier

som utvecklats sedan mitten av artonhundratalet. Dessa inkluderar de klassiska teorierna av Maxwell Garnett (1904)²⁸ och Bruggeman (1935)²⁹. Flertalet teorier i bruk förutsätter omagnetiskt material i såväl partiklar som matris och partikelstorlekar som är mycket små jämfört med våglängden i såväl partiklar som värdmaterial. Både Maxwell Garnett och Bruggeman förutsätter dessutom att partiklarna är sfäriska, en i praktiken inte särdeles begränsande förutsättning. En generalisering av Maxwell Garnetts teori till att inbegripa magnetiska partiklar i vakuum presenterades i en doktorsavhandling av Grimes (1990)³⁰. Denna teori medger också partiklar som är stora jämfört med våglängden.

Ovannämnda teorier, liksom en hel rad andra, inryms i en nyutvecklad teori för effektivvärden för permittivitet och permeabilitet hos partikelkompositer. Både värdmaterial och partiklar tillåts vara magnetiska med permittivitet och permeabilitet av godtycklig storlek. I sin hittillsvarande form förutsätter teorin att partiklarna är homogena sfärer, en förutsättning som bekvämt kan generaliseras. För nanotekniktillämpningar vore t.ex. partiklar i form av sfärer omgivna av ett tunt dielektriskt skal av avvikande material en intressant sådan generalisering.

Metamaterial som utnyttjar resonanseffekter mellan partiklar och värdmaterial med exceptionella elektromagnetiska egenskaper kan modelleras med den nyutvecklade teorin. Härigenom kan inte bara avancerade absorbermaterial och frekvensselektiva strukturer i form av bulkmaterial modelleras. Metamaterial för helt andra tillämpningar, med aldrig tidigare uppnådda prestanda, kan designas, t.ex. miniaturiserade men ”elektriskt stora” antenner.

Ledande polymerer för multispektral signaturanpassning

Ledande polymerer har studerats och utvecklats på den civila markanden under flera år. Exempel på civila tillämpningar är allt ifrån antistatiska plastförpackningar till displayteknik. För försvarstillämpningar är ledande polymerer mycket intressanta inte bara för deras statiska ledande/halvledande egenskaper utan också för den potentionella förmågan att kunna styra deras elektromagnetiska egenskaper.

Inom projektet har främst polymeren PEDOT (poly(3, 4- etylenedioxythiophen)) studerats. PEDOT är stabil och finns kommersiellt tillgänglig. Projektet inleddes med en litteraturstudie³¹ där grundläggande egenskaper hos dopade konjugerade polymerer beskrevs. Projektet har studerat ledande polymerer för olika tillämpningar främst inom de tre våglängdsområdena:

- Visuellt
- IR
- Radar (MHz - THz)

Visuella området

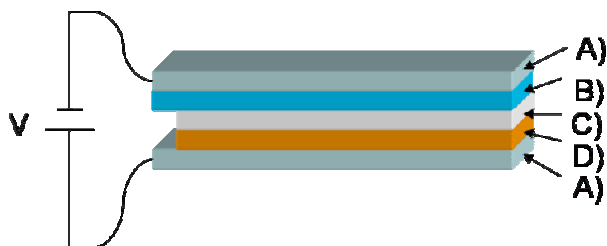
Under senare tid har forskning och utveckling kring displayteknik gjort stora framsteg. Det finns idag tunna och böjbara bildskärmar som har potential till att utnyttjas som visuella kamouflagesystem. Bilder av omgivningen kan projiceras på tunna bildskärmsytor som kan appliceras på olika plattformars skrovytor. Detta öppnar stora möjligheter att snabbt ändra den visuella signaturen. Speciellt vid internationella insatser i mycket skiftande miljöer är detta av stor betydelse, liksom vid bevaknings-/övervakningsuppdrag där man normalt önskar en hög signatur, men vid fientlig beskjutning önskar låg signatur.

Projektet har bl. a. studerat och visat att man kan få en färgförändring hos PEDOT genom att lägga en spänning över ett PEDOT-skikt som applicerats på en elektrolyt.

IR-området

Liksom inom det visuella området är styrbar signatur inom IR-området mycket intressant. Det finns idag sensorsystem med mycket hög känslighet som kan detektera små variationer mellan en plattform och dess omgivnings IR-signatur.

Projektet har konstruerat en mätcell, se Figur 22, vars transmissionsegenskaper har studerats.



Figur 22: Cell bestående av A) Ledande dopat kisel (1-10 Ohm cm) B) polymer (PEDOT) C) elektrolyt (poly-[oxymethylene-oligo(oxyethylene)]) dopat med LiClO_4 D) litiumdopad vanadinoxid, för jonlagring

En varierbar spänning applicerades över cellen. Transmissionen ökade för högre negativ spänning. Resultaten har bl. a. presenterats vid Optikdagar i Sverige 2004.³²

Internationellt har det publicerats relativt få artiklar rörande ledande polymerers IR-egenskaper. Argun skriver dock i en review-artikel³³ om elektrokromism om framgångsrika försök med såväl volframoxid (WO_2) som polymerbaserade komponenter där PANI-CSA, PEDOT eller PProDOT-Me2 använts tillsammans med guld. Där är också Chandransekhar's arbete med styrbara ytor för militära och rymdtillämpningar omnämnda^{34, 35}.

Radarområdet

Inom radarområdet har huvudsakligen två tillämpningar studerats:

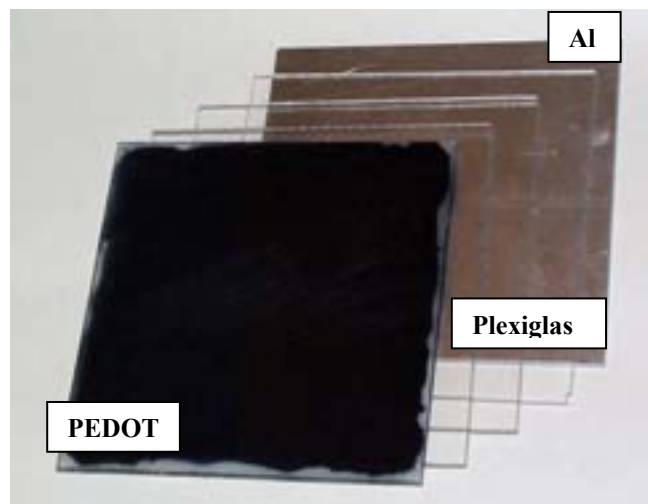
- Styrbara radomer
- Styrbara radarabsorbenter

Det internationella intresset för styrbara radomer har ökat markant under senare år. Tanken bakom denna typ av radomer är att de skall vara transparenta för de egna sensorsystemen, ex. radarsystem, då dessa används, men helt reflekterande då systemen inte används (on/off-funktion). Tidigare har (icke styrbara) frekvensselektiva radomer (FSS) utvecklats, men de kan inte skydda den egna plattformen mot hotsensorer som arbetar inom samma frekvensområde som de egna systemen. Konventionella FSS-radomer baseras vanligen på ett eller flera skikt bestående av små slitselement i ett periodiskt metalliskt mönster. Dessa slitselement är resonanta, så små ändringar i materialegenskaperna kan ge stora variationer i radomens elektromagnetiska egenskaper. Genom att kombinera en konventionell FSS-yta med styrbart ledande polymerer öppnas nya möjligheter till radomer med styrbara egenskaper.

Det internationella intresset för styrbara radarabsorbenter har ökat markant under senare tid. Genom att använda enkla absorbentstrukturer, vars egenskaper kan styras i frekvensled, öppnas möjligheter

att utveckla adaptiva system där sensorer känner av hotsensorernas frekvenser och anpassar absorbentens reflektionsegenskaper efter dessa.

Projektet har koncentrerats till studier av en enkel absorbenttyp, som kallas Salisbury-screen. Absorbenten baseras på ett tunt förlustskikt, som kan utgöras av en ledande polymer. I Figur 23 visas ett foto på en struktur som har studerats och resultaten har avrapporterats i.³⁶



Figur 23: Foto på en Salisbury-screen

Forskningsproduktion 2004-2005

Under projektets gång har vi åstadkommit bl a följande:

FOI-rapporter

C Nilsson et al, Reflektansstyrning med hjälp av konjugerade polymerer, FOI-R--1196--SE

E H Karlsson et al, Pigments with Potential for Adaptable Optical Properties, FOI-R--1256--SE

H Kariis et al, Styrbara signaturmaterial – möjligheter och forskningsbehov, FOI-R--1412--SE

T Hallberg et al, Development of low-emissive camouflage paint: Final report, FOI-R--1592--SE

J-O Ousbäck, Principer för en styrbar Salisbury-screen, FOI-R--1598--SE

Moffatt, Wigstein, Sol-gel synthesis of VO₂ thin films and the effects of doping, FOI-R--1684--SE

H Kariis et al, Styrbara signaturmaterial: forskning 2004-2005, FOI-R--1794--SE

Vetenskapliga artiklar

Rung, A. Ribbing, C-G., Polaritonic and Photonic Gap Interactions in a Two-dimensional Photonic Crystal, *Phys. Rev. Lett.*, 92, no. 123901

Högström, H., Ribbing, C-G., Polaritonic and photonic gaps in SiO₂/Si and SiO₂/air periodic structures, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, vol. 2, pp 23-32, 2004.

H. C. Strifors, G. C. Gaunaurd, and A. Sullivan, "Time-Frequency Signatures of Penetrable or Impenetrable Targets Buried in Lossy Half-Spaces," *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, Vol. 6, July 2005, 271–289.

A Rung, C-G. Ribbing, M. Qiu "Gap Maps for Triangular Photonic Crystals with a Dispersive and Absorbing Component" *Phys. Rev. B* 72, 205120 (2005).

H. Högström, G. Forssell, C G. Ribbing "Realization of selective low emittance in both thermal atmospheric windows" *Opt. Eng.* 44(2) 026001-1 – 7(2005).

C. G. Ribbing, H. Högström, A. Rung "Studies of Polaritonic Gaps in Photonic Crystals" *Appl. Opt.* September (2005).

H. Högström, C G. Ribbing "Polaritonic and Photonic gaps in SiO₂/Si and SiO₂/air periodic structures".
Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. Vol. 2/1, 23-32 (2004)

R T Olsson, G Salazar-Alvarez, M S Hedenqvist, U W Gedde, F Lindberg, S J Savage
Controlled Synthesis of Near-Stoichiometric Cobalt Ferrite Nanoparticles
Chem. Mater. 17, 5109-5118 (2005)

Konferensbidrag

Forssell, G.,

Comparison between polarization measurements and model calculations of cenosphere surfaces with different depolarization properties and surface coverage,
SPIE, Orlando, USA, 2004, *Polarization: Measurement, analysis, and remote sensing VI*, Proc. of SPIE vol. 5432, p. 63-74,
FOI-S--1722--SE

Nilsson, C., Karlsson, E. H., Kariis, H.,

Test cell for IR transmission measurements on conjugated polymers,
Optik i Sverige, Svenska Optiksällskapet, Linköping, Sverige, 2004

Kariis Hans

Föredrag om "Nya material" vid SAT-symposium på SAAB 14-15 september 2004.
Linköping, FOI Memo 1003 (2004)

Strifors, H. C.,

Bistatic Radar Cross-Sections of Low-Signature Targets,
NATO SECRET Symposium on Sensors and Sensor Denial by Camouflage, Concealment and Deception, Brussels, Belgium, 2004

R.T. Olsson, G. Salazar-Álvarez, S.J. Savage, M.S. Hedenkvist, M. Muhammed, U. Gedde,
Synthesis and characterization of cubic cobalt ferrite nanoparticles,
9th International Conference on Ferrites (ICF-9), San Francisco, USA, 22-27 august 2004

Jinglan Deng, R.T. Olsson, S.J. Savage, M.S. Hedenqvist, U.W. Gedde,

Surface treatment of ferrite nanoparticles,
40th IUPAC Symposium on Macromolecules: MACRO 2004, Paris, France, 4-9 juli 2004

Högström, H., Rung, A., Ribbing, C-G.,

Foton- och polaritongap – vänner och fiender, Optik i Sverige,
Svenska Optiksällskapet, Linköping, Sverige, 2004

H. C. Strifors, T. Andersson, D. Axelsson, and G. C. Gaunaurd,

“A Method for Classifying Underground Targets and Simultaneously Estimating their Burial Conditions,”
in *Automatic Target Recognition XV*, Sadjadi, F. A., Ed., Proc. SPIE Vol. 5807, 2005, 112–121.

Stefan Björkert, Cesar Lopes, Åsa Andersson, Torleif Martin

Sol derived BeO/air photonic structures
SPIE Optics and Photonics in Security and Defence, Brügge, Sept 2005

Kariis Hans

Conducting polymers, a key component in future soldier equipment.
Trilateral workshop on urban warfare, Proc. 21100:13478/05, Stockholm, May 18-19 (2005)
FOI-S--1878--SE

Nilsson Christina

IR-camouflage paint for face, i.e. soldier protection.

FMV Trilateral workshop Urban warfare, Stockholm, May 18-19, 2005

FOI-S--1882--SE

A. Rung, H. Högström, C-G. Ribbing

"Interaction between photonic and polaritonic gaps studied with photonic band structure calculations".

SPIE Proc. 5184, (Ed. P. Lalanne, San Diego, Aug 2003), 126-133.

A. Rung, H. Högström, C-G. Ribbing

"Destruction of a polaritonic gap by a high index matrix"

Int. Symp. Phot. and EM Crystal Structures, PECS-V, Kyoto March 7-11 (2004).

A. Rung, H. Högström, C-G. Ribbing

"Polaritonic and Structural Gaps in 1-dimensional Photonic Crystals"

Int. Symp. Phot. and EM Crystal Structures, PECS-V, Kyoto March 7-11 (2004).

C-G. Ribbing, H. Högström, A. Rung

"Studies of Polaritonic Gaps in Photonic Crystals"

Optical Interference Coatings VIII, June 27-July 2, 2004, Tucson, Arizona,

Invited presentation, FB-1.

C-G. Ribbing, H. Högström, A. Rung

"Interaction between Photonic Gaps and Lattice Excitations in 1-3 Dimensions"

Deutsche Forschungsgemeinschaft, Annual Meeting, Berlin, March 7-8 (2005)

Invited presentation HL-42.5.

Herman Högström and Carl G. Ribbing

"A three-dimensional photonic crystal with a polaritonic gap"

Int. Symp. Phot. and EM Crystal Structures, PECS-VI, Crete June 19-24 (2005).

C-G Ribbing, Inbjuden talare, Inst of Physics, Kunming i Kina 28-30 okt (2004)

T Hallberg, Airframe and Plume Radiometric Modelling - workshop, 8-9 feb (2005)

H Kariis

Advanced materials for signature management

Proceedings of the Second International Conference on Military Technology, Stockholm (2005),

ISBN 91-85401-27-7

H Kariis

Inbjuden talare vid Sigma-Flyg, "Styrbara multispektrala signaturmaterial", 16 nov (2005)

Avhandlingar

H. Högström

"Interaction of Photonic and SiO₂ Polaritonic Gaps in One-Dimensional Periodic Structures"

Licentiate thesis, Uppsala universitet, 2004.

A. Rung

"Numerical Studies of Energy gaps in Photonic Crystals"

Ph. D thesis, Acta Universitatis Upsaliensis 67 (2005).

R. T. Olsson

"Synthesis and characterization of ferrite based nanocomposites for microwave absorbing applications"

Licenciate Thesis, KTH, Stockholm (2005).

Patent

C-G. Ribbing, A. Rung

Sätt att skapa ett material med låg emittans i ett eller två bestämda våglängdsområden.

Sv. patent nr 0104195-3, publ-nr 520 490 (2003).

C-G. Ribbing

Energibesparande skenmål

Sv. pat ans nr 0301609-4 (2003).

H. Kariis, E. H. Karlsson, C. Nilsson, T. Hallberg

Kommersiell sekretess råder för ansökan

Sv pat ans nr 0502472-4 (2005)

Medverkan vid initiering av övrig verksamhet

Projektet har delfinansierat ansökan DARC till EU:s sjätte ramprogram, avslag

Projektet har delfinansierat ansökningsarbetet till ALOA, CEPA3, prioriteras högt av FMV

Projektet har genererat två idéer till accelerationsprojekt, stöd till FM "här och nu"

Projektet har bidragit till att initiera ett FMV-projekt "Ansiktsmaskeringsfärg med nya tillämpningar", avslutat

Kursmedverkan

Intern studiecirkel kring "SAT-handbok Mark" har fortlöpt under 2004.

Två projektmedarbetare deltog vid "Introduction to Military Thermal Imaging" på SIRA i Bromley, UK.

En projektmedarbetare deltog i kursen "Stealth 2004" i London, 15-16 november, 2004.

Tre projektmedarbetare deltog vid workshop i materialoptik, LiTH, Linköping, 10 november, 2004.

Fyra projektmedarbetare deltog i Sortertekniks intraprenörskapsprogram våren 2005

En projektmedarbetare deltog i "Stealth 2005" i London, 28-29 november, 2005.

Tre projektmedarbetare deltog i FOI-kurs "Spridningsteori", Gerhard Kristensson, LTH, våren 2005

Kunskapsförmedling till kund

Projektet har aktivt medverkat i grupperingarna SAM-SAT, Sigma-flyg, Epsilon-flyg samt medverkat vid två nationella SAT-symposier.

Resultat från FOI:s forskning har kommit till nytta inom Försvarmaktens nanoteknikprogram (MSCC), där forskningen även nyttiggörs av försvarsindustrin (Saab Barracuda).

Hårdvara

”Salisbury screen” baserad på ledande polymerer tillverkad för tester.
Högtemperaturmätutrustning inköpt för både IR- och radarområdet.
Fyrpunktsprob för ytrestitivitetsmätningar tillverkad.
Mätcell för transmissionsmätningar på polymerer i IR utvecklad.
Tunnfilmsmätutrustning för mikrovågsområdet inköpt.

Samverkan

FMV, Saab, Chelton Applied Composites, ALOA, PvTT, UU, KTH, LiU

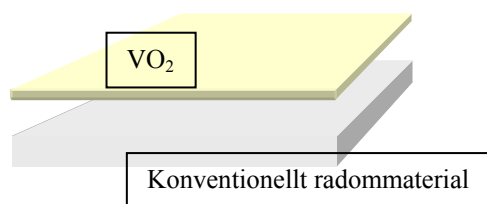
Ytor för demonstration 2007

Vi kan identifiera några resultat från projektet som skulle kunna visas upp i en demonstration redan under 2007. Annan verksamhet ligger på en längre tidshorisont innan en någorlunda fältmässig demonstration kan göras.

Exempel 1: Styrbar Radomstruktur för mikrovågsområdet

År 2006 startar ett 2-årigt projekt, Styrbara multispektrala signaturmaterial, som avser att under år 2007 demonstrera en styrbar multispektral struktur. Strukturen skall ha goda signaturegenskaper inom VIS, IR- och mikrovågsområdet, med styrbara egenskaper i minst ett av frekvensområdena. Ambitionen är att tillverka en tillräckligt stor struktur så att dess signaturegenskaper kan demonstreras vid någon typ av fältförsök. Nedan visas två exempel på tänkbara strukturer.

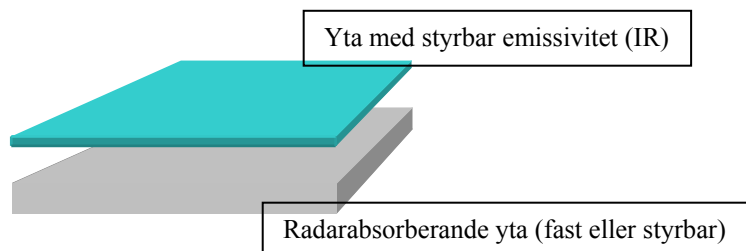
Vanadindioxid (VO_2) är ett ämne som, i odopat tillstånd, ändrar sina egenskaper från icke ledande till ledande tillstånd då temperaturen överstiger ca 68°C . VO_2 har studerats i det nu avslutade projektet, men då främst med inriktning på IR-egenskaperna. Under år 2006 kommer VO_2 s mikrovågsegenskaper att studeras. Om VO_2 visar sig ha tillräcklig stor dynamik mellan det ledande och icke ledande tillståndet kan ett sådant skikt användas till en styrbar radom (on/off-funktion), se Figur 24. Intresset för styrbara radomer har ökat markant på senare tid. Detta på grund av att de frekvensselektiva radomer som idag finns tillgängliga inte ger fullgoda signaturegenskaper.



Figur 24: Exempel på en potentiell styrbar radomstruktur.

Exempel 2: Yta med styrbar emissivitet (IR-området)

Ett annat exempel på en tänkbar demonstrator visas i Figur 25. Denna struktur består av en mikrovågsabsorberande yta, med fasta eller styrbara egenskaper, samt ett skikt med styrbar emissivitet inom IR-området. Tanken är att utveckla en struktur med låg radarmålyta och styrbar IR-emissivitet, för att snabbt kunna anpassa plattformens IR-signatur till omgivningen. Styrbar IR-signatur har blivit allt viktigare med tanke på försvarets nya uppgifter i internationella insatser med snabbt skiftande miljöer.



Figur 25: Exempel på en potentiell styrbar multispektral struktur.

Förslag till fortsatt arbete

Under 2006 bör signaturmaterialforskningen fokusera på ett färre antal spår med större potential för framgångsrika resultat. En större integrering av experimentellt arbete med modelleringsverksamhet bör också ske inom dessa områden.

Frekvensselektiva switchbara radomer bör studeras. Detta bör ske i samverkan med industrin. Syftet skall vara att senast 2007 kunna demonstrera en teknik.

Forskningen kring fotonkristaller utvecklas och kunskaperna integreras med övriga erfarenheter från projektet. Den framgångsrika forskningen från dessa områden kan kombineras för att ge nya intressanta egenskaper:

- Organiska material
- Keramer
- Fotonkristaller

Forskning kring högttemperaturmaterial bör ske i samverkan med planerat projekt inom FoT25, flygfarkoster.

Studier av material för signaturanpassning mot bistatisk radar bör fortsätta. Det är inte klarlagt hur effektiv konventionell stealth-teknik, som bygger på bortspegling av strålning, är mot bistatisk radar. Dock är det troligt att materialen har minst lika stor betydelse som mot monostatisk radar.

En mer omfattande analys av var behovet av styrbar signaturanpassning i internationella operationer är störst behöver göras.

Referenser

- ¹ Å. Bergqvist, "Mikrovågsabsorberande skikt", FOA Rapport AH-459 (1958)
- ² T. Hallberg, E. Hedborg-Karlsson, C-G. Ribbing, C. Nilsson, S. Björkert, G. Forssell, H. Kariis, L-G. Heimdahl, "Optiska Signaturmaterial: Slutrapport", FOI-R--0942--SE
- ³ J-O. Ousbäck, "Projekt Avancerade radarabsorbenter: Slutrapport", FOI-R--1124--SE
- ⁴ J. Fagerström, G. Forssell, P. Hermansson, H. Strifors, N. Wellander, "Projektet Modellering av signaturmaterial: Slutrapport", FOI-R--1520--SE
- ⁵ S. Savage, "Nanocomposite materials: Final report", FOI-R--1524--SE
- ⁶ C. Moffatt, A. Wigstein, "Sol-gel synthesis of VO₂ thin films and the effect of W and Re doping", FOI-R--1684--SE (2005)
- ⁷ T. Hallberg, T. Niinimäki-Heikkilä, E. Hedborg-Karlsson, P.S. Salonen, C. Nilsson, A. Jänis, "Development of low-emissive camouflage paint: Final report", FOI-R--1592--SE (2005)
- ⁸ E. H. Karlsson, C. Nilsson, T. Hallberg, H. Kariis, "Pigments with Potential for Adaptable Optical Properties", FOI-R--1256--SE (2004)
- ⁹ C-G. Ribbing, A. Rung "Sätt att skapa ett material med låg emittans i ett eller två bestämda våglängdsområden", Sv. patent nr 0104195-3, publ-nr 520 490 (2003)
- ¹⁰ A. Rung "Numerical Studies of Energy gaps in Photonic Crystals", Ph. D thesis, Acta Universitatis Upsaliensis 67 (2005)
- ¹¹ A. Rung, C-G. Ribbing, "Polaritonic and a Photonic Gap Interaction in a 2D Photonic Crystal", *Phys. Rev. Lett.* 92, 123901 (2004)
- ¹² H. Högström, C-G. Ribbing "Polaritonic and Photonic gaps in SiO₂/Si and SiO₂/air periodic structures", *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, Vol. 2/1, 23-32 (2004)
- ¹³ A. Rung, C-G. Ribbing, M. Qiu "Gap Maps for Triangular Photonic Crystals with a Dispersive and Absorbing Component", *Acc Phys. Rev B*, October (2005)
- ¹⁴ H. Högström, G. Forssell, C G. Ribbing "Realization of selective low emittance in both thermal atmospheric windows", *Optical Engineering*, vol. 44(2) 026001-1 – 7 (2005)
- ¹⁵ S. Björkert, C. Lopes, Å. Andersson, and T. Martin, "Sol derived BeO/air photonic structures," presented at SPIE International Symposium on Optics/Photonics in Security and Defence 2005, Congress Centre Oud Sint-Jan in Bruges, (2005)
- ¹⁶ www.3m.com
- ¹⁷ www.ube.com
- ¹⁸ www.damaskos.com
- ¹⁹ www.goodfellow.com

-
- ²⁰ S. K. Andersson, Ö. Staaf, "Measurement of the directional emittance of polycrystalline beryllium oxide", *Infrared Physics & Technology* 38 pp. 443-448 (1997)
- ²¹ G. Forssell, "Polarisationseffekter i IR-området- En förstudie", FOA-R -- 95-00194-3.1 -- SE, (1995)
- ²² G. Forssell, T. Hallberg, "Polarization properties in the IR region of painted surfaces and rough Al surfaces", FOA-R -- 00-01646-615 -- SE, (2000)
- ²³ G. Forssell, E. Hedborg-Karlsson, "Passive IR polarization measurements applied to rough surfaces consisting of cenosphere particles covered with gold", SPIE Vol. 4819, Seattle, (2002)
- ²⁴ G. Forssell, E. Hedborg-Karlsson, "Measurements of polarization properties of camouflaged objects and of the denial of surfaces covered with cenospheres", SPIE Vol. 5075, Orlando, (2003)
- ²⁵ G. Forssell, "Comparison between polarization measurements and model calculations of cenosphere surfaces with different depolarization properties and different coverage", SPIE Vol. 5432, p. 63-74, Orlando, (2004)
- ²⁶ R. Storn and K. Price, "Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", *J. Global Optimization*, vol. 11, pp. 341-359, (1997)
- ²⁷ H. Strifors and G. C. Gaunard, "Bistatic Scattering by Bare and Coated Perfectly Conducting Targets of Simple Shape", PIERS 2002, Progress in Electromagnetics Research Symposium, Cambridge Massachusetts, USA (2002)
- ²⁸ J.C. Maxwell Garnett, "Colours in metal glasses and metal films" *Phil. Trans. R. Soc. London*, Ser. A, vol. 203, pp. 385-420, (1904)
- ²⁹ D.A.G. Bruggeman, "Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen, I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen", *Ann. Phys. Lpz*, vol. 24 pp. 636-679, (1935)
- ³⁰ C.A. Grimes, Doctoral Dissertation, The University of Texas at Austin, (1990)
- ³¹ C. Nilsson, T. Hallberg, E. H. Karlsson, J-O. Ousbäck, A. Jänis, H. Kariis, "Reflektansstyrning med hjälp av dopning av konjugerade polymerer" FOI-R--1196--SE (2004)
- ³² Nilsson, C., Karlsson, E. H., Kariis, H., Test cell for IR transmission measurements on conjugated polymers, Optik i Sverige, Svenska Optiksällskapet, Sverige, Linköping, (2004)
- ³³ A. A. Argun et al "Multicolored Electrochromism in Polymers: Structures and Devices" *Chem. Mater*, vol. 12, 4401-4412, review (2004)
- ³⁴ P. Candrasekhar et al, "Conducting Polymer (CP) infrared electrochromics in spacecraft thermal control and military applications", *Synthetic Metals*, pp. 135-136 (2003)
- ³⁵ P. Candrasekhar et al, "Large Switchable Electrochromism in the Visible Through Far-Infrared in Conducting Polymer Devices", *Adv. Funct. Mater.*, 12 no 2 February (2002)

³⁶ J-O Ousbäck, ”Principer för en styrbar Salisbury-screen” FOI-R--1598--SE (2005)