

Anders Eriksson, Markus Henriksson

# Försök med OPO för generering av laserstrålning i våg- längdsbandet 2-5 $\mu\text{m}$

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1347--SE

Oktober 2004

ISSN 1650-1942

**Teknisk rapport**

Anders Eriksson, Markus Henriksson

# Försök med OPO för generering av laserstrålning i våglängdsbandet 2-5 $\mu\text{m}$

<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--1347--SE	<b>Klassificering</b> Teknisk rapport
	<b>Forskningsområde</b> 6. Telekrig och vilseledning	
	<b>Månad, år</b> Oktober 2004	<b>Projektnummer</b> E3020
	<b>Delområde</b> 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
	<b>Delområde 2</b>	
<b>Författare/redaktör</b> Anders Eriksson Markus Henriksson	<b>Projektledare</b> Ove Steinvall	
	<b>Godkänd av</b> Ove Steinvall	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> FM	
	<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b>	
<b>Rapportens titel</b> Försök med OPO för generering av laserstrålning i våglängdsbandet 2-5 µm		
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> Olika metoder för generering av laserstrålning i våglängdsbandet 2-5 µm har undersökts. Två olika huvudspår med OPO framträder som möjliga. Det ena är med hjälp av ZnGeP <sub>2</sub> , vilket kan fungera i hela våglängdsintervallet men ställer höga krav på en pumplaser, medan det andra huvudspåret, med periodiskt polat LiNbO <sub>3</sub> , kan pumpas med en enklare laser men endast klarar av att generera strålning upp till ca 4 µm.  En fiberlaser, med våglängden 1940 nm och pulsrepetitionsfrekvensen 10 kHz, avsedd att pumpa en OPO med ZnGeP <sub>2</sub> utvärderades. Våglängdskonverteringen av denna laser misslyckades dock då fiberlaserns prestanda ej nådde upp till den utlovade specifikationen. Med en annan typ av pumplaser med låg pulsrepetitionsfrekvens (10-20 Hz) samt högre pulsenergi fungerade en avstämbar konvertering av en 2 µm pumpstrålning till strålning mellan 3 och 5 µm.  Arbete med det andra spåret, att med periodiskt polat LiNbO <sub>3</sub> konvertera 1064 nm från en Nd:YVO <sub>4</sub> -laser med hög pulsrepetitionsfrekvens till 2,3 - 3,5 µm, har inletts.		
<b>Nyckelord</b> OPO, ZGP, PPLN, fiberlaser		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 17 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--1347--SE	<b>Report type</b> Technical report
	<b>Programme Areas</b> 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	<b>Month year</b> October 2004	<b>Project no.</b> E3020
	<b>Subcategories</b> 61 Electronic Warfare including Electromagnetic Weapons and Protection	
	<b>Subcategories 2</b>	
<b>Author/s (editor/s)</b> Anders Eriksson Markus Henriksson	<b>Project manager</b> Ove Steinvall	
	<b>Approved by</b> Ove Steinvall	
	<b>Sponsoring agency</b> FM	
	<b>Scientifically and technically responsible</b>	
<b>Report title (In translation)</b> Experiments with OPO for generation of laser radiation in the wavelengthband 2-5 µm		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> <p>Different methods for generation of laser radiation in the wavelengthband between 2 and 5 µm have been investigated. Two main methods with OPO seem possible. One method is to use ZnGeP<sub>2</sub> that can work in the entire wavelengthband but puts high demands on the pump source. The second method is to use periodically poled LiNbO<sub>3</sub> that can be pumped with a simpler laser but can only generate radiation below ca 4 µm.</p> <p>A fiberlaser, with an output wavelength of 1940 nm and a 10 kHz pulse repetition frequency, designated to pump an OPO with ZnGeP<sub>2</sub> was evaluated. The wavelength conversion failed since the performance of the fiberlaser did not fulfil the promised specification. A tuneable conversion of a 2 µm pump wavelength to radiation between 3 and 5 µm succeeded with another kind of pump laser with a pulse repetition frequency of 10-20 Hz and higher pulse energy.</p> <p>Work with the second concept, to convert 1064 nm from an Nd:YVO<sub>4</sub> laser with high pulse repetition frequency with periodically poled LiNbO<sub>3</sub> to between 2.3 and 3.5 µm, has been initiated.</p>		
<b>Keywords</b> OPO, ZGP, PPLN, fiberlaser		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 17 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	

1	Inledning.....	5
2	Pulsad fiberlaser .....	7
2.1	Specifikationer.....	7
2.2	Karakterisering .....	7
3	ZGP OPO-experiment .....	8
3.1	Mätningar med fiberlaserpump på FOI och FFI.....	8
3.2	Mätningar med 20 Hz tandem OPO system på FFI .....	9
3.3	Mätningar med 10 Hz tandem OPO system på FOI.....	10
4	Planerat PPLN OPO system .....	12
4.1	Kvasifaspassning .....	12
4.2	Materialet PPLN.....	12
4.3	Systemspecifikation.....	13
5	Slutsats och fortsatt arbete.....	16
6	Referenser.....	17

# 1 Inledning

Laserkällor för DIRCM tillämpning i våglängdsområdet 2-5  $\mu\text{m}$  finns i nuläget inte att köpa kommersiellt. FOI har därför ett eget utvecklingsprogram för att bygga en laser lämplig för systemtester och karakteriseringsmätningar. Kraven på en laser i ett DIRCM-system är en PRF på 10-20 kHz med en medeleffekt på ca 5 W samt en stråldivergens nära diffraktionsgränsen. En studie av olika möjligheter att realisera en laser lämplig för DIRCM har tidigare genomförts<sup>1</sup>. Verksamheten påbörjades 2002 och de inledande resultaten har rapporterats i tidigare rapporter<sup>2</sup>.

Alla system som försöker täcka en stor del av det aktuella spektrumet bygger på ickelinjär optik och optisk parametriska oscillatorer (OPO). I en OPO delas en foton upp i två med längre våglängd där förhållandet mellan energierna för de nya fotonerna bestäms av att strålningen som genereras i olika delar av den ickelinjära kristallen måste interferera konstruktivt, en form av rörelsemängdskonservering. Ett stort problem är att hitta lämpliga kristallmaterial för våglängdskonverteringen. Effektiva lasrar som kan pumpa en OPO finns framförallt vid 1  $\mu\text{m}$ , t.ex. Nd:YAG lasrar. Det finns däremot ingen praktiskt användbar ickelinjär kristall som är transparent i hela området från 1  $\mu\text{m}$  till 5  $\mu\text{m}$ . De kristaller som kan pumpas med en 1  $\mu\text{m}$  laser börjar absorbera vid kortare våglängder än 5  $\mu\text{m}$ . Några exempel som används mycket i olika tillämpningar är KTP (KTiPO<sub>4</sub> -2,8  $\mu\text{m}$ ), KTA (KTiAO<sub>4</sub> -3,5  $\mu\text{m}$ ) och LiNbO<sub>3</sub> (-4  $\mu\text{m}$ ). Även periodiskt polade versioner av dessa material förekommer. De våglängdsgränser som anges här gäller för pulser på tiotals nanosekunder och hög repetitionsfrekvens. Med kortare pulser (ps) eller högre pulsenergi som kan fås i 10 Hz lasrar kan våglängdsintervallen sträckas ut något eftersom kristallerna då tål högre absorption. Den enda nu tillgängliga kristall som kan generera 4-5  $\mu\text{m}$  med hög repetitionsfrekvens är ZGP (ZnGeP<sub>2</sub>) men den har en absorptionskant vid ungefär 2  $\mu\text{m}$  och är därmed ej transparent för Nd:YAG.

Då det är välkänt att man behöver en 2  $\mu\text{m}$  pumplaser för att konvertera till 4-5  $\mu\text{m}$ -området med ZGP så har många försök gjorts med varierande framgång att konstruera en lämplig sådan. Ingen riktigt bra källa har dock kommit fram. De mest lovande resultaten hittills bygger på ett koncept med två på varandra följande OPOer där man utgår från en 1  $\mu\text{m}$  laser som först konverteras till 2  $\mu\text{m}$  varpå den andra OPOn pumpas med strålningen som genererats i den första OPOn<sup>3,4</sup>. Lasrarna som har använts för detta har dock varit ganska extrema system. En annan möjlighet är att använda en holmiumlaser som pump<sup>5,6</sup>. Ett problem med detta är att Ho-lasrar inte kan pumpas direkt med dioder utan behöver pumpas med en annan laser vid 1,9  $\mu\text{m}$ . Denna pumplaser har dock inget krav på korta pulser och är därför något lättare att tillverka. Generellt används någon form av thuliumlaser. En intressant form är den Tm-fiberlaser som använts vid FFI i Norge<sup>6</sup> eftersom den kan placeras separerat från holmiumlasern vilket underlättar inbyggnad i t.ex. flygplan. Fiberlaserns goda stälkvalitet gör den mycket lämpad för ändpumpning av lasrar och här är begränsningen i toppeffekt inget problem.

Tidigare har erbium- och ytterbium-fiberlaser visats kunna pumpa PPLN OPOer<sup>7,8</sup>. En ny möjlighet som provats på FOI är att använda en pulsad Tm-fiberlaser för att direkt pumpa en ZGP OPO. Tyvärr visade det sig att lasertillverkaren inte klarade av att uppnå utlovad prestanda varför försöken med OPO ej resulterade i någon mätbar genererad

strålning i aktuellt våglängdsområde. Denna laser och försök gjorda med den beskrivs i den här rapporten. Det är dock möjligt och ganska troligt att en Tm-fiberlaser med önskade prestanda inom några år finns tillgänglig på marknaden.

## 2 Pulsad fiberlaser

En pulsad fiberlaser beställdes från IPG med avsikt att kunna pumpa en ZGP OPO för generering av strålning mellan 3 och 5  $\mu\text{m}$ . En fördel med en fiberlaser gentemot andra lasrar är att de har en mycket bra strålprofil pga. av modselektiviteten i fibern, vilket är en förutsättning för effektiv våglängdskonvertering. Det är vidare en mycket kompakt luftkyld laser.

### 2.1 Specifikationer

Vid vår beställning av den pulsade Tm-fiberlasern från IPG begärde vi en pulsrepetitionsfrekvens på 10 kHz vid 2  $\mu\text{m}$ . Med en pulsenergi på 2 mJ ger detta en medeleffekt på 20 W. Mer data på lasern finns redovisade i Tabell 2.1. Lasern är opolariserad varför endast hälften av denna energi är användbar till våglängdskonverteringen. Enligt beräkningar skall denna energi räcka för att tända en OPO. Andra grupper har kunnat visa på en energidensitet på runt 0,02 J/cm<sup>2</sup> för ZGP OPO pumpade runt 2  $\mu\text{m}$ <sup>9</sup>. Detta sammantaget gjorde oss synnerligen optimistiska att kunna använda denna typ av laser till att pumpa en ZGP OPO. Det visade sig dock att IPG hade problem att infria de enligt offerten utlovade prestanda och klarade inte av att leverera mer än en fjärdedel av den överenskomna pulsenergin.

### 2.2 Karakterisering

För att kunna använda fiberlasern till att pumpa en OPO krävdes en noggrann karakterisering av laserstrålen. De strålparametrar som undersöktes var effekt, pulsrepetitionsfrekvens, pulslängd, strålprofil, linjebredd och polarisation. Det visade sig att en del av dessa parametrar var mer eller mindre beroende av den drivström som pumpade lasern.

**Tabell 2.1** Data på den pulsade Tm-fiberlasern från IPG

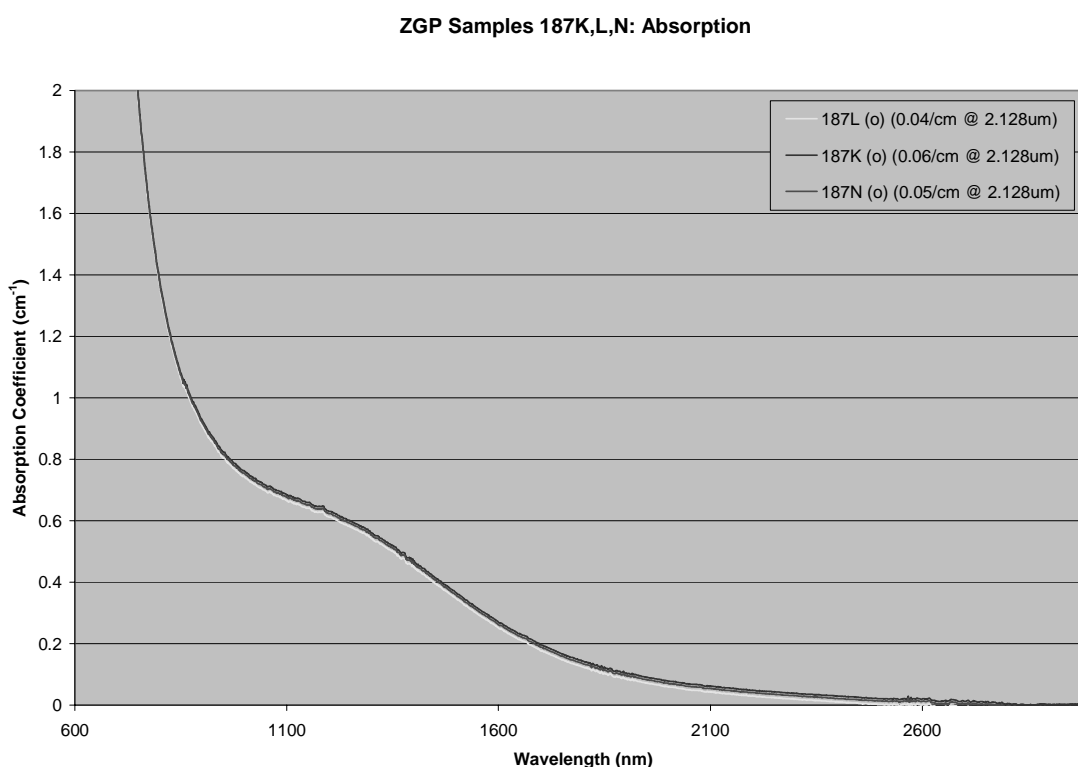
	Data enl. offert	Uppnådda prestanda enl. IPG	Uppmätta prestanda på FOI
Våglängd	1,94 $\mu\text{m}$	1,94 $\mu\text{m}$	1,94 $\mu\text{m}$
Pulsenergi	2 mJ	0,5 mJ	0,46 mJ
Pulslängd	100 ns	150 ns	120 ns
Pulsrepetitionsfrekvens	10 kHz	10 kHz	10 kHz
Strålkvalitet, M <sup>2</sup>		<1,1	< 1,6
Linjebredd		"less than a few nm"	< 2 nm

Den största skillnaden mellan offertens data och de levererade prestanda är naturligtvis pulsenergin som endast uppgick till en 0,5 mJ att jämföra med de utlovade 2 mJ. Vidare var pulslängden något längre och därmed blev toppeffekten ytterligare något lägre.



### 3 ZGP OPO-experiment

ZGP är ett material som har visats kunna generera 2-5  $\mu\text{m}$  strålning mycket effektivt. Det har en icke linjär koefficient ( $d_{14}$ ) på ca 75 pm/V vilket kan jämföras med  $d_{\text{eff}}$  på ca - 4 pm/V för  $\text{LiNbO}_3$ . Dessutom har 8-12  $\mu\text{m}$  kunnat genereras med ZGP emedan den är mer eller mindre transparent ända upp till 12  $\mu\text{m}$ . Vi har införskaffat 2 stycken ZGP-kristaller vilka byggts in i en OPO<sup>10</sup>. Andra grupper har påvisat en konversionseffektivitet på upp över 50 % med denna typ av OPO. De flesta bygger dock på en pumplaser-våglängd runt 2050-2200 nm vilket är något längre än Tm-lasern levererar varför absorptionen i ZGP blir något högre med denna pumplaser.



**Figur 3.1** Absorption som funktion av våglängd för de kristallerna som levererats från BAE enligt leverantören. Vid 1,94  $\mu\text{m}$  understiger absorptionen 0,1  $\text{cm}^{-1}$

#### 3.1 Mätningar med fiberlaserpump på FOI och FFI

Den ovan beskrivna pulsade Tm-fiberlasern var tänkt att kunna användas för att pumpa en OPO med två ZGP kristaller. Även FFI var intresserade av detta koncept och därför beslöt vi att tillsammans försöka få igång OPO:n hos FFI i Norge.

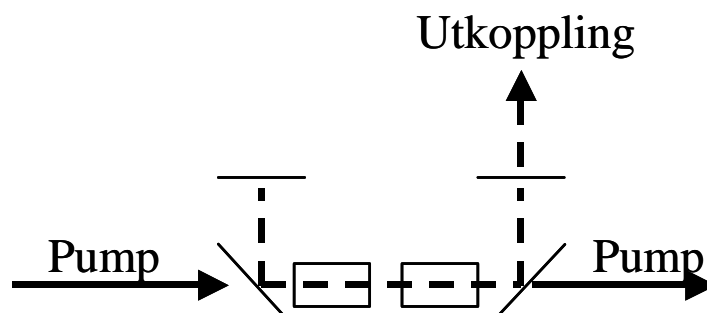
Beräkningar för en OPO pumpad med en fiberlaser vid 1,94 nm har redovisats i en tidigare rapport<sup>2</sup>.

Lasern visade sig vara mycket känslig för tillbakareflekter av laserstrålning. Vid för mycket reflektion av strålning i fiberlasern stängdes den automatiskt av. Troligen har

lasern en skyddskrets som stänger av pumpningen. Fiberlasrar har vanligen en masteroscillator och ett eller flera förstärkarsteg. Tillbakareflekterad strålning kan förstärkas i slutsteget och skada masteroscillatorn. För att i möjlig mån undvika detta, utnyttjades en för ändamålet avsedd optisk isolator från OFR bestående av två polarisatorer med en däremellan placerad faradayrotator. Denna isolator visade sig dock inte transmittera optimalt vid 1940 eftersom den var tillverkad för 2060 nm samt hade en apertur på endast 4 mm diameter.

En pyroelektrisk kamera från Spiricon samt kniveggsmetoden användes för att karaktärisera strålens rumsliga profil så att rätt lins till fokusering av strålen in i OPOn kunde nyttjas.

Två olika koncept testades för OPOn. Den enklaste var en rak OPO med plana speglar. Den andra var en s.k. U-resonator med vilken tillbakareflektionen minimeras. Den raka kaviteten testades med ett antal olika speglar, dock utan framgång vad gäller konvertering. Denna kavitet hade problem med reflektion av pumpstrålen tillbaka in i fiberlasern vilket denna inte klarade av utan då automatiskt stängdes av. Detta gjorde att OPOn inte kunde pumpas med full effekt från lasern. För att komma runt detta problem konstruerades en U-resonator, vilken dock betydligt svårare att linjera än en rak OPO emedan fler komponenter ingår i samma kavitet. Inte heller våra försök med denna typ av OPO resulterade i någon generering av konverterad strålning. Enligt de beräkningar som gjorts räcker den tillgängliga pumpenergin knappt till att nå över tröskeln för OPOn. Det är således extremt svårt att linjera och optimera denna då den endast tänds vid optimal linjering. Med högre pumpenergi är förfarandet något mer förlåtande och en optimering av kaviteten kan enklare utföras då OPOn väl hjälpligt fungerar.



**Figur 3.2** I figuren visas en schematisk bild av en u-resonator med de två ZGP-kristallerna. Denna konfiguration minimerar tillbakareflektionen av pumpstrålen.

### 3.2 Mätningar med 20 Hz tandem OPO system på FFI

Då det inte lyckades att generera någon strålning med hjälp av vår OPO pumpad av fiberlasern beslöt vi att undersöka kristallerna lite närmare för att bekräfta att det inte var något fel på dem. FFI har byggt en KTP OPO med en ringkavitet med 4 stycken kristaller. Denna pumpas med en Nd:YAG laser med en prf på 20 Hz. Med denna laser erhålles betydligt högre pulsenergi än vad fiberlasern kunde leverera. Ca 1,5 mJ vid 2050 nm med en pulslängd på ca 20 ns användes för att testa vår ZGP-kristall. En rak OPO med en av våra två kristaller konstruerades. Då denna pumplaser har betydligt

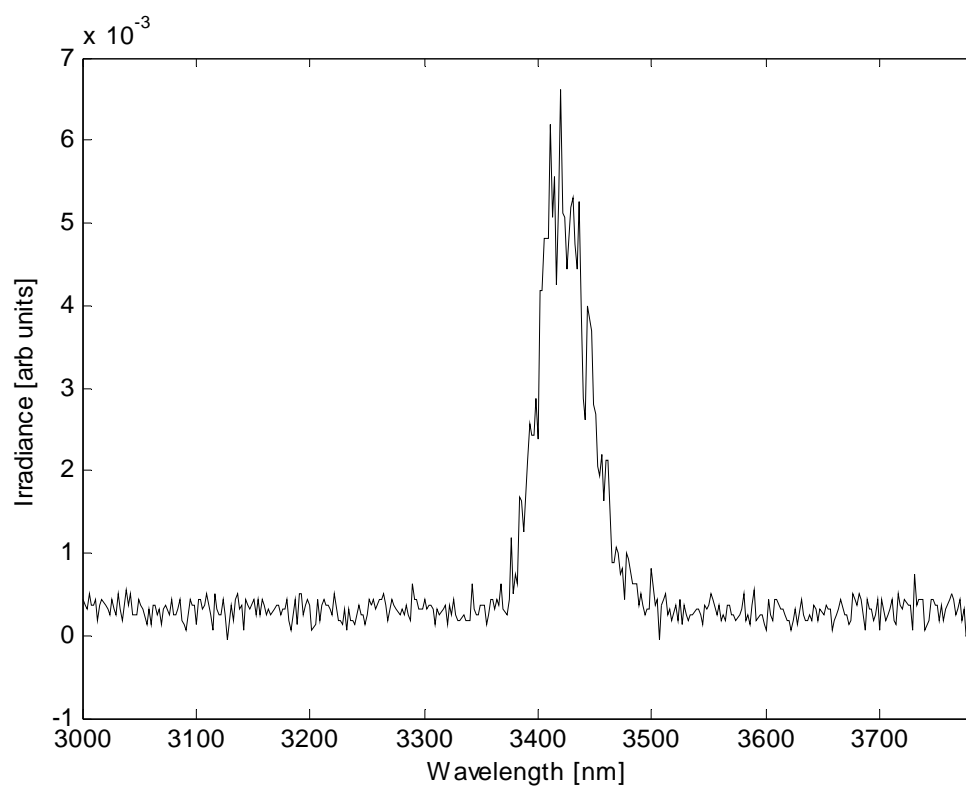
längre våglängd än fiberlasern krävdes det att kristallen vinklades till en infallsvinkel på ca 14°-16° mot normalen för att kunna erhålla faspasning. OPOspeglarna placerades tätt intill kristallen så att en kort singelresonant kavitet skapades. En OPO med den ena av kristallerna faspasad till en signalvåglängd på ca 3,6 µm gav 0,4 mJ/puls (signal + idler). Kristallen är ytbehandlad och kluven för 1,94 µm varför en något bättre konvertering kan förväntas med en pumplaser med kortare våglängd.

### 3.3 Mätningar med 10 Hz tandem OPO system på FOI

Även på FOI finns tillgång till Nd:YAG pumpad OPO. Det är en Powerlite från Continuum som använts för att pumpa en Mirage 3000. I Mirage konverteras den dubblade Nd:YAG lasern med hjälp av KTP kristaller. Den är ursprungligen designad för att generera mycket fin linjebredd i våglängdsområdet mellan 1,45 µm och 4 µm. Då vi inte anser det nödvändigt med en så smal linjebredd för vår applikation har vi valt att utesluta de delar som anses överflödiga för vårt ändamål. Mirage består i sitt grundutförande av en OPO, en icke resonant oscillator (NRO) samt en optisk parametrisk förstärkare (OPA). Det första steget, en OPO, pumpas med 532 nm och är konstruerad för att generera en signal med mycket smal linjebredd. Den genererar en SLM (Single Longitudinal Mode) med hjälp av ett gitter inne i kaviteten. Den alstrade signalen används som frö till steg nummer två, NROn. Även den pumpas med 532 nm från den frekvensdubblade Nd:YAG lasern. Vi beslutade att utesluta frövåglängden till vår NRO, emedan den ansågs överflödig och gjorde lasersystemet onödigt komplext, för att i stället endast pumpa oscillatorn med 532 nm. Med denna lyckas vi gott och väl generera den nödvändiga energin till att pumpa en ZGP OPO varför även steg nummer tre (OPA) avlägsnades ur strålgången. OPA:n pumpas annars med 1064 nm från Nd:YAG lasern. Eftersom vi är intresserade av en våglängd 1940-2000 µm skulle denna OPA även generera en idlervåglängd vid ca 2300 nm.

NROn med sina två KTP-kristaller ställdes in för faspasning med signalvåglängden på 728 nm och idlervåglängden på 1980 nm. Signalvåglängden mättes upp med en spektrometer medan en monokromator (Digikröm 240) användes för att studera idlervåglängden. En linjebredd på ca 2 nm uppmättes för både signal och idler. NROn används således till att pumpa ZGP OPOn. Kristallerna är ytbehandlade för att pumpas med 1,94 µm, men eftersom absorptionen är något mindre redan vid 2,0 µm valde vi att pumpa OPOn med något längre våglängd än fiberlaserns emission.

Mycket nyligen har vi lyckats tända en ZGP OPO pumpad med 1978 nm från nämnda NRO. Vår OPO består av två plana speglar och en 14 mm lång ZGP kristall. Vid en pumpenergi på ca 500 µJ gav OPOn ca 150 µJ konverterad strålning. Det är möjligt att dels den relativt stora linjebredden (> 2 nm FWHM) samt den fluktuerande temporala pulsprofilen och den transversella profilen inte är optimala för att erhålla god konvertering. Det är dock möjligt att använda Miragens OPO-steg som frö för att erhålla en smalare linjebredd på NRO-stegets idler vilken pumpar ZGP OPOn. Karaktärisering och vidareutveckling av denna OPO kommer i det närmaste att utföras, varvid två stycken "walk-off" kompenserade kristaller kommer att utnyttjas i samma OPO. I Figur 3.2 visas ett spektrum av den erhållna signalstrålningen. Denna våglängd är avstämbbar med hjälp av kristallens riktning i OPOn alternativt med pumpens våglängd.



**Figur 3.2** Spektrum genererad med hjälp av en monokromator på signalen från ZGP-OPOn.

## 4 Planerat PPLN OPO system

Då den tänkta Tm:fiberlasern inte gick att använda till att pumpa ZGP OPO:n har beslutet fattats att prova med en PPLN OPO pumpad med en laser vid 1064 nm. Detta innebär att vi begränsar det möjliga våglängdsintervallet men får möjligheten att använda en mer konventionell 1  $\mu\text{m}$  pumplaser.

### 4.1 Kvasifaspassung

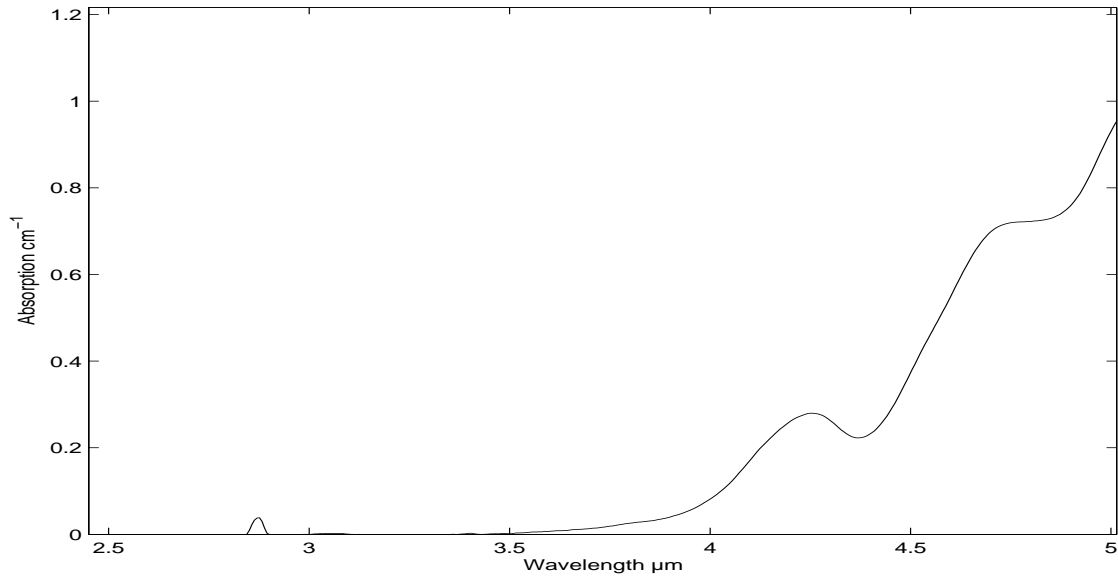
En metod för att uppnå faspassung eller rörelsemängdskompensering är kvasifaspassung (QPM). Detta innebär att då pump och signal har hamnat  $90^\circ$  ur fas så vänds den elektriska polariteten i kristallen så att faspassningsfelet får motsatt tecken och den konstruktiva interferensen fortsätter. Då strålningen hamnat  $-90^\circ$  ur fas och byts åter igen tecken på faspassningsfelet. Effekten av detta kommer att bli en oscillation i tillväxttakten som resulterar i en effektiv förstärkning som visserligen är  $2/\pi$  svagare än om faspassningen hade varit perfekt, men eftersom QPM inte är känsligt för polarisation kan diagonalelementen i den susceptibilitetstensor som beskriver icke linjäriteten användas. För faspassung genom dubbelbrytning måste man istället använda olika polarisationer för de olika våglängderna och har därmed oftast lägre icke linjäritet. Ett annat problem från dubbelbrytningen som man slipper med QPM är s.k. ”walk-off”, att olika polarisationer har olika utbredningsriktning och därmed ger en apertureffekt som begränsar den till frekvenskonvertering användbara kristalllängden.

### 4.2 Materialet PPLN

Periodiskt polad litiumniobat växer i stora enkristaller som sågas i tunna skivor och poleras jämna. Med hjälp av fotolitografi och högspänning skapas den periodiska polariteten med för ändamålet avpassad period. Polningsprocessen är maximerad till 1 mm tjocka skivor och oftast används endast 0,5 mm. Detta och den låga skadetröskeln för  $\text{LiNbO}_3$  gör att den maximala effekten som kan konverteras i OPO:n är relativt begränsad.

Vidare begränsar absorptionen återkopplingen och ger därmed högre tröskel än annars skulle ha varit fallet. Absorptionen i litiumniobat som visas i Figur 4.1 begränsar våglängden till ca 4  $\mu\text{m}$  för normala lasrar med nanosekundpulser och repetitionsfrekvenser på tiotals kHz. Med kortare pulser eller avsevärt högre pulsenergi kan något längre våglängder uppnås. Ett problem är dock då skadetröskeln.

PPLN har problem med fotorefraktiva skador på grund av utarmning av laddningsbärare i området där ljusintensiteten är stark. Detta avhjälps genom att kristallen hålls varm, vanligen mellan 100 och  $200^\circ\text{C}$ , så att laddningsbärare skapas även i de obelysta områden och kan diffundera in i strålen.



**Figur 4.1** Absorption i PPLN kristallen. Absorptionen mellan 0,5 och 2,5 μm är försumbar.

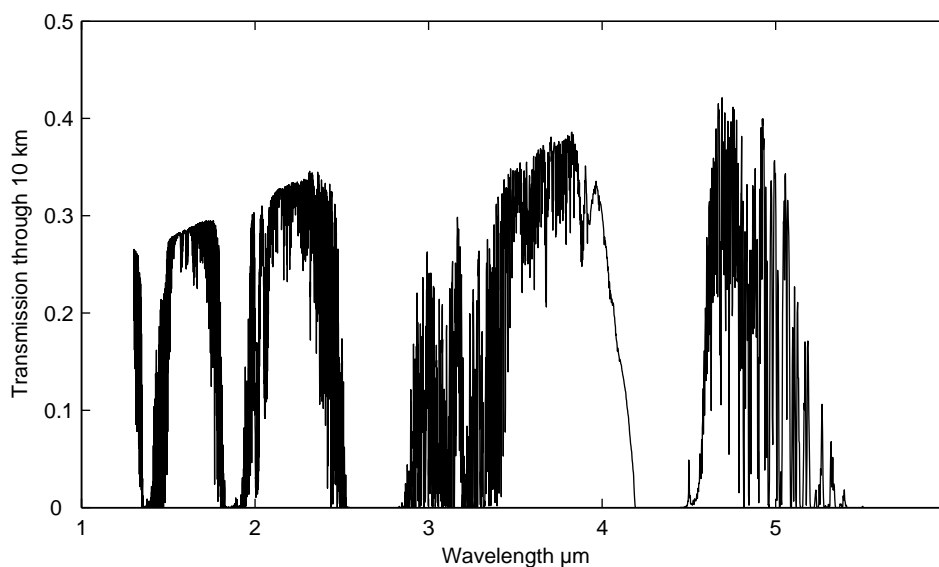
### 4.3 Systemspecifikation

En Nd:YVO<sub>4</sub> pumplaser har anskaffats från Azura Laser AG. Det är en laser som emitterar vid 1064 nm. Laserenergin har mätts till 470 μJ per puls med 10 kHz repetitionsfrekvens, men lasern kan köras från singelpuls upp till 100 kHz pulsrepetitionsfrekvens samt även kontinuerligt. Pulslängden vid 10 kHz PRF är 26 ns och toppeffekten är därmed 18 kW. Lasern är linjärpolariserad och har god strålkvalitet,  $M^2 < 1,2$ . Linjebreddden har mätts med en monokromator till att vara mindre än 0,2 nm. Det är dock möjligt att den är smalare än så eftersom detta är av samma storleksordning som mätupställningens upplösning.

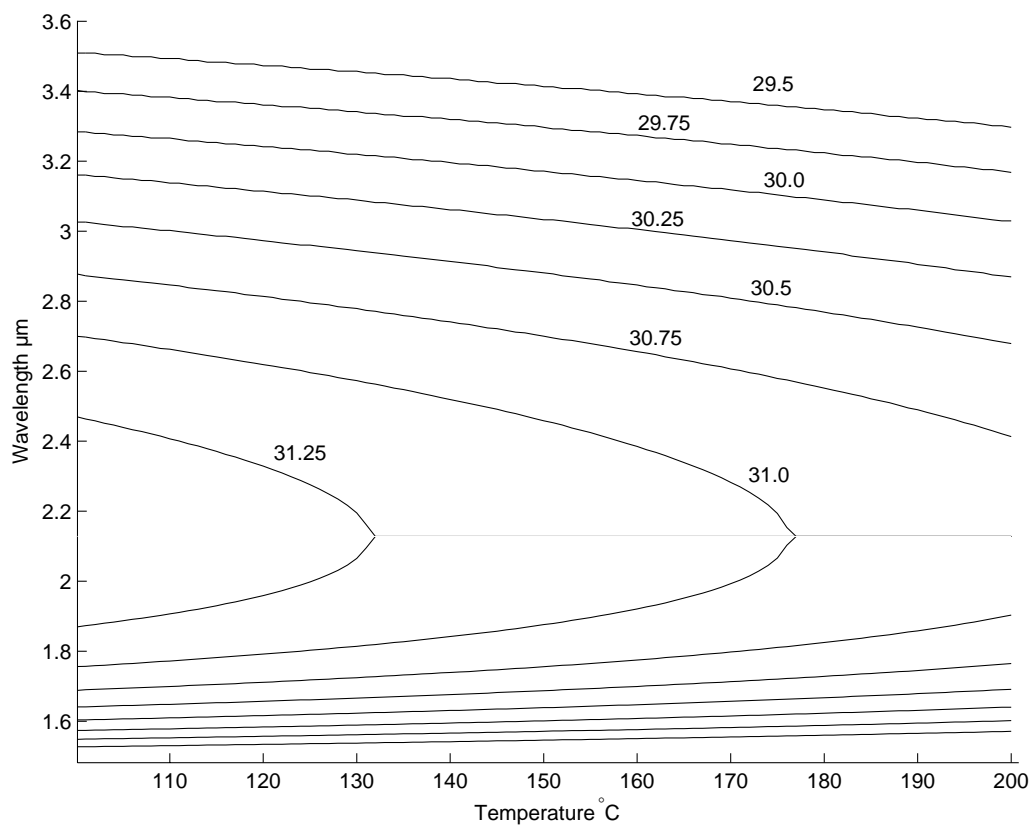


**Figur 4.2** Den nyligen inhandlade Nd:YVO<sub>4</sub> lasern från Azura Laser AG.

Ett mycket intressant våglängdsområde då atmosfärstransmissionen i Figur 4.3 betraktas är 2-2,4  $\mu\text{m}$ . En periodiskt polad kristall har beställts från Stratophase Ltd som är ett avknoppningsföretag från ORC i Southampton. Kristallen har nio olika perioder från 29,5 till 32,5  $\mu\text{m}$  och är antireflexbehandlad för området 1,5-3,5  $\mu\text{m}$ . Detta medger även utnyttjande av nedre kanten av atmosfärsfönstret mellan 3 och 4,2  $\mu\text{m}$ . Mätssystemet kommer dock kräva byte av spegeluppsättning för att ändra våglängd. Faspassningskurvor för de olika perioderna med varierande temperatur finns i Figur 4.4.



**Figur 4.3** Transmissionen genom 10 km luft vid havsnivå för olika våglängder.



**Figur 4.4** Avstämningsskurvor för den icke linjära kristallen. De olika kurvorna betecknar olika periodicitet ( $\mu\text{m}$ ) i polningen.



## 5 Slutsats och fortsatt arbete

Tyvär visade det sig att fiberlasertekniken ännu inte var mogen för att pumpa en ZGP-OPO. Det är dock fortfarande ett område att hålla ögonen på inför framtiden eftersom potentialen är mycket stor. Den fiberlaser vi hade tillgänglig för utvärdering visade sig inte vara kraftfull nog att användas att pumpa en OPO med och sändes därför tillbaka till tillverkaren.

Arbetet med tandem-OPOer vid låg PRF visar att höga krav ställs på pumplaser och på det första OPO-steget för att möjliggöra skalning till högre PRF. Det ställs krav både på strålprofil och linjebredd. En framkomlig väg kan vara att använda någon form av intrakavitetskonfiguration eftersom högre intensiteter då finns tillgängliga. Denna metod att skapa en 2  $\mu\text{m}$  pumpkälla undersöks nu närmare.

Arbete på en laserkälla med avsikt att täcka ett mindre våglängdsområde än vad en ZGP OPO kan klara av baserad på en 1  $\mu\text{m}$  laser och en PPLN OPO har påbörjats. Lasern som är en standardprodukt för industriella tillämpningar har levererats och uppfyller specifikationen. Arbetet med design av OPOer för främst 2,3-2,4  $\mu\text{m}$  och 3,3-3,5  $\mu\text{m}$  har påbörjats och komponenter har beställts.

## 6 Referenser

---

- <sup>1</sup> A. Eriksson, O. Steinvall, L. Sjöqvist, M. Lindgren, "Tuneable Lasers for Countermeasures - A Literature Survey", Linköping, FOI 2002, FOI-R--0536--SE
- <sup>2</sup> M. Henriksson, A. Eriksson, L. Sjöqvist, "Lägesrapport för utveckling av motmedelslaser", Linköping, FOI 2003, FOI-D--0134--SE
- <sup>3</sup> E. Cheung, S. Palese, H. Injeyan, C. Hofer, J. Ho, R. Hilyard, H. Komine, J. Berg., "High Power Conversion to Mid-IR Using KTP and ZGP OPOs", *Advanced Solid State Lasers, OSA TOPS vol XXVI*, p 514-517, 1999
- <sup>4</sup> L. Marshall, J. Earl, A. Johnson, T. Pollak, P. Schunemann, "Efficient 2-5  $\mu\text{m}$  KTP, KTA and  $\text{ZnGeP}_2$  OPOs", *Advanced Solid State Lasers, OSA TOPS vol I* p 171-173, 1996
- <sup>5</sup> P. Budni, L. Pomeranz, M. Lemons, C. Miller, J. Mosto, E. Chicklis., "Efficient mid-infrared laser using 1.9- $\mu\text{m}$ -pumped Ho:YAG and  $\text{ZnGeP}_2$  optical parametric oscillators", *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 17, No. 5, p. 723-728, 2000
- <sup>6</sup> E. Lippert, G. Rustad, G. Arisholm, K. Stenersen, "Fibre laser pumped 3-5  $\mu\text{m}$  source", poster presentation at Northern Optics, Helsinki, 2003
- <sup>7</sup> P.E. Britton, H.L. Offerhaus, D.J. Richardson, P.G.R. Smith, G.W. Ross, D.C. Hanna, "Parametric oscillator directly pumped by a 1.55- $\mu\text{m}$  erbium-fiber laser", *Optics Letters*, Vol. 24, No. 14, p. 975-977, 1999
- <sup>8</sup> W. Ruifen, Chia Li Ching Lindy, Ng Hui Khoon, "Nanosecond >4-Micron PPLN OPO Pumped by a Yb Fiber Laser", *CLEO 2004*, poster CThT34, 2004
- <sup>9</sup> P. Phua, K. Lai, R. Wu, T. Chong, "High-efficiency mid-infrared  $\text{ZnGeP}_2$  optical parametric oscillator in a multimode-pumped tandem optical parametric oscillator", *Applied Optics* **38**, 563-565, 1999
- <sup>10</sup> G. Arisholm, E. Lippert, G. Rustad, K. Stenersen, "Effect of resonator length on a doubly resonant optical parametric oscillator pumped by a multilongitudinal-mode beam", *Optics Letters* **25**, 1654-1656, 2000