

# Varde Ljus: Möjligheter med fotoniska integrerade kretsar för totalförsvaret

*Axel Runnholm & Eva Dalberg*

Fotoniska integrerade kretsar (*Photonic Integrated Circuits, PIC:s*) är en teknik där optiska komponenter, såsom vågledare, lasrar och detektorer, integreras på ett och samma chip för att styra och bearbeta ljus. Detta görs för att skapa fotoniska system som är motsvarigheter till traditionella elektronikchip. PIC:s utgör en central del av modern fotonik och möjliggör snabbare dataöverföring och lägre energiförbrukning än traditionella lösningar. Här sammanfattar vi grundprinciperna bakom PIC-teknik, den pågående utvecklingen, dess tillämpningar, samt de viktigaste delarna och utmaningarna i förhållande till försvaret. Studien har gjorts genom en översiktlig litteraturstudie, en aktörsanalys samt en workshop för att klargöra försvarsspecifika tillämpningar. Vi drar slutsatsen att PIC-tekniken är intressant för försvaret men att huvuddelen av utvecklingen kommer ske på det civila området där det finns starka drivkrafter och resursstarka intressenter. Våra rekommendationer är därför: 1 – att den civila forskningen bevakas. 2 – att kunskapsuppbyggande verksamhet fortsätter vid FOI, samt 3 – att utvecklingen av samarbeten med både akademi och industri prioriteras. Vi bedömer att en indikator på att fältet bör ges ökat fokus är lyckad storskalig serieproduktion av komplexa PIC:s då det visar att fältet är moget för bredare implementering och att systemkostnader sannolikt kommer sjunka.

## INTRODUKTION

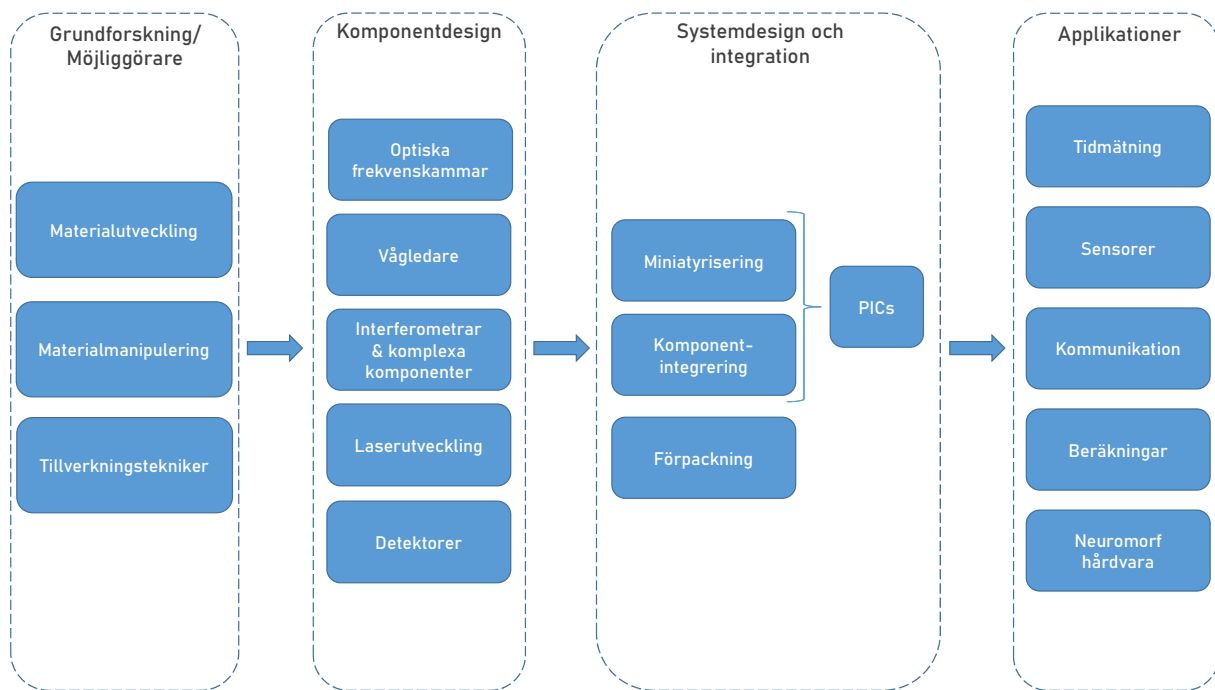
**A**LLTMER I SAMHÄLLET drivs av beräkningsteknik och datorer och vi har vant oss vid en snabb utveckling där individuella elektroniska system minskar i storlek och energiförbrukning. Utvecklingen har nu nått en punkt där helt nya innovativa tekniker krävs för fortsatta effektiviseringar. I det här arbetet presenterar vi en översikt över användningen av fotonik för detta syfte och hur fotonik kan nyttjas för att skapa en ny typ av avancerad optisk elektronik.

Vi börjar med att ge en introduktion till den del av fotonikfältet vi avgränsat oss till och varför den har potential att vara disruptiv. Därefter ger vi en mer detaljerad bild av ämnet och kopplingar till andra teknikområden. Sedan kommer huvudfokuset för detta memo där vi går in på möjliga tillämpningar vi ser inom försvarsområdet. Därefter undersöker vi

var forskning och utveckling av fotoniska integrerade kretsar (*Photonic Integrated Circuits, PIC:s*) bedrivs och vilka drivkrafter och potentiella kullkastare som vi kan se. Slutligen ger vi en sammanfattning av våra rekommendationer.

### Vad är fotonik?

Fotonik omfattar brett aspekterna generering, manipulering och detektion av ljus. Här behandlar vi framförallt de aspekter av forskningsämnet fotonik som berör integration av ljusutnyttjande system, såsom optisk fiber, med konventionell elektronik, till exempel genom att modulera ljus från en laser med elektroniska signaler. Denna del av fotonikområdet är inte ny utan används för till exempel konvertering av digitala signaler till optiskt ljus i fiberkablar vilka är grunden för dagens internetinfrastruktur.



**Figur 1.** Översikt över området fotoniska integrerade kretsar där forskningen delas i fyra separata faser: möjliggörare, komponentdesign, systemdesign och integration, och slutligen tillämpningar.

Framsteg inom material och tillverkningsteknik innebär att ljusbaserade system, t.ex. lasrar, nu går från stora, relativt klumpiga, labbänkssystem till små integrerade system, så kallade PIC:s, vilket är fokus för det här memot. I takt med att teknikerna för manipulation av ljus förbättras så blir också de potentiella användningsområdena och möjligheterna fler.

### Varför ljus?

De senaste årens utveckling inom maskininlärning och andra beräkningsintensiva applikationer har satt ett högt tryck på beräkningsinfrastruktur och tydliggjort gränserna för konventionella elektroniska komponenter och arkitekturer. Vidare har miniatyrering av elektroniska komponenter nått barriärer som sätts av kvantmekaniska effekter. Moores lag, som beskriver förbättringen av beräkningssystem över tid som en fördubbling av kapaciteten vartannat år, har inte kunnat upprätthållas. Det finns därför ett enormt tryck på att finna nya innovativa arkitekturer för att snabba på och förbättra beräkningshårdvara. Utnyttjandet av fotoner, det vill säga ljuspartik-

lar, istället för elektroner utgör ett attraktivt sätt att komma förbi flaskhalsar som finns i de beräkningssystem vi har idag. Detta på grund av deras hastighet och att de inte genererar värme, vilket är den största energiförlusten i vanlig elektronik.

Utveckling av autonoma system utgör också en drivkraft för mer effektiv informationsbehandling både inom beräkningar och sensorer som behandlar ljus.

### METOD

Resultaten som presenteras här är baserade på en studie av akademisk litteratur. Sökningar genomfördes med Scopus och Web of Science och fokuserade på reviewartiklar från de senaste 5 åren. Resultatet sammanställdes och analyserades, och parallellt genomfördes en aktörskartläggning. Memoutkastet kvalitetsgranskades och diskuterades av experter vid FOI vid en workshop som genomfördes i Linköping i november 2025. Baserat på diskussionsunderlaget formulerade vi rekommendationerna.

## ÖVERSIKT AV FORSKNINGSFÄLTET

För att ge en översikt över de aspekter av PIC-forskningen som vi beaktar här så har vi delat upp området i en sekvens av fyra faser, ordnade längs en mognadsgradsaxel med teoretisk grundforskning å ena sidan och praktiska slutanvändarsystem å andra sidan (se figur 1). Vi går igenom de fyra faserna individuellt, men poängterar att behandlingen inom varje sektion är ett urval av de viktigaste frågorna och långt ifrån heltäckande.

### Grundforskning

I centrum för PIC området ligger utveckling av material som kan användas för att styra, kontrollera och modifiera ljus. Ett flertal materialplattformar existerar, t.ex. kisel, indiumfosfid, kiselnitrid, galliumarsenid och litiumniobat. I de implementeringar som används idag så nyttjas ofta det som kallas för bulk-kristaller, dvs. relativt stora kristaller vars egenskaper kan skräddarsys genom inkludering av spårämnen och liknande. Litiumniobat ( $\text{LiNbO}_3$ , LN) utgör en klassisk materialplattform och används flitigt för konstruktion av snabba optiska modulatorer som används för kommunikation i optisk fiber.

Genom utvecklingen av nya material och tillverkningstekniker så har nya möjligheter uppkommit. Speciellt kan nämnas dopnings- och etsningstekniker som tillåter tillverkningen av tunna litiumniobat-filmer (*Thin Film Lithium Niobate*, TFLN). TFLN bibehåller de goda optiska egenskaperna hos LN-kristallen men medger också att system miniatyriseras och att små optiska systemkomponenter tillverkas genom att filmen etsas [1].

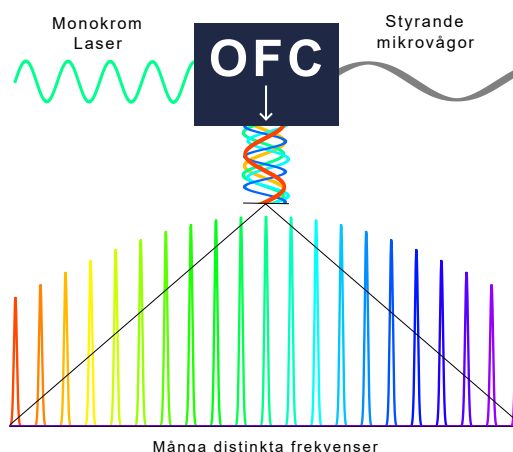
Som noterats är LN och derivat därav långt ifrån de enda materialplattformarna som utforskas i dagsläget. Mycket uppmärksamhet har lagts på kiselbaserade material, eftersom produktionsteknikerna för kisel är väl utarbetade. Dock medför den plattformen vissa materialfysiska begränsningar som gör det mer utmanande att designa högpresterande kiselbaserade vågledare och andra komponenter. Även andra material, exempelvis litium tantalat, aluminiumbaserade material, indiumfosfid, 2D-material som grafen etc. har undersökts. Det finns idag ingen tydlig konvergens mot en specifik ledande materialplattform, vilket indikerar fältets relativt omogna och forskningsbetonade natur, även

om kiselbaserade material tycks utgöra en stor andel av system som är mer produktifierade.

De fotonikaspekter vi behandlar här bygger på grundforskning inom ett flertal olika domäner, t.ex. laser och ljusdetektion. Emission och detektion kan i någon mån ses som början och slutstadiet av ett fotoniskt system. Framsteg inom laserteknik som t.ex. pulsade och våglängdsjusterbara lasrar har banat väg för många av de tillämpningar och komponenter vi kommer diskutera här. För PIC-området är ett centralt fokus hur man kan miniatyrisera lasrar och detektorer så att de kan integreras tillsammans med övriga komponenter. Dock är laserteknik ett forskningsämne i sin egen rätt och vi kommer inte att behandla ämnet mer ingående här.

### Komponentdesign

Nästa sektion i Figur 1 är design av optiska komponenter. En av de mest grundläggande komponenterna i PIC:s är vågledare vars syfte är att begränsa och leda ljus i en optisk krets. Oftast görs detta genom att designa "kanaler" i materialet som har ett annat brytningsindex jämfört med det kringliggande materialet [2]. När ljuset når en sådan brytningskontrast studerar det tillbaka (total intern reflektion), och begränsas därmed till vågledaren. Ju större kontrasten är, desto lägre förluster av ljus vid reflektionen, särskilt i skarpa böjar, och ju högre effektivitet har vågledaren. Detta motiverar mycket av materialutvecklingen i grundforskningssegmentet. Vågledare kan sedan användas för att bygga optiska komponentnätverk baserat på



**Figur 2.** Illustration av en optisk frekvenskam (*Optical Frequency Comb*, OFC). Inmatningen till OFC:n är en laser som endast innehåller en distinkt våglängd av ljus vilket i OFC-systemet ombildas till en kam – dvs. en serie av distinkta frekvenser med exakt och konstant separation.

flertalet komplexa optiska effekter, till exempel interferens.

Fokus här är en specifik optisk teknik, optiska frekvenskammor (*Optical Frequency Combs*, OFC:s), eftersom de återkommer som komponenter i många fotoniska integrerade kretsar. Optiska frekvenskammor är i grunden en teknik för att bilda ett spektrum med många individuella smala spektrallinjer som har en konstant våglängdsseparation från varandra. Det resulterande spektrumet ser ut som en kam av linjer, därav benämningen (se Figur 2). Frekvenskammor är inte en ny teknik utan har varit under utveckling sedan 1990-talet och belönades med nobelpriiset i fysik 2005. Forskningen inom området har inte avstannat och framsteg inom material har gjort det möjligt att öka flexibiliteten, minska storleken och energiförbrukningen samt justera bredd och täthet på kamlinjerna.

Innovativa system som t.ex. mikrokammar, dvs. OFC-system som är små nog att integreras på elektronikchip istället för att kräva stora separata lasrar, har drastiskt expanderat de möjliga användningsområdena [3] (se även figur 3).

### Systemdesign och integrering

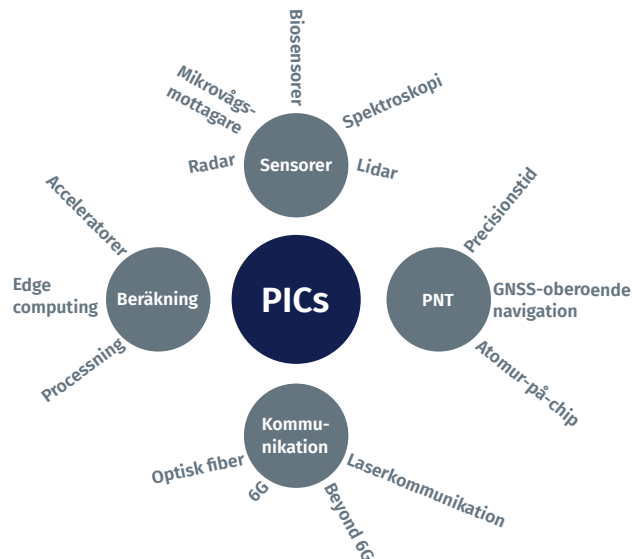
Till syvende och sist utgör enskilda komponenter inte kompletta system med praktisk användning utan måste integreras med andra optiska eller klassiska system för att nyttjas. Sådan integrering är inte utan utmaningar och utgör det sista delsegmentet innan fullskaliga tillämpningar.

Inom forskningen ligger mycket av den senaste tidens utveckling just inom systemintegration. Den utvecklingen har kommit som ett resultat av att materialutveckling möjliggjort miniatyrering. PIC:s har strukturmässigt mycket gemensamt med elektroniska integrerade kretsar men komponenterna måste struktureras annorlunda för att till fullo kunna ta tillvara fotonernas fördelar. Därav är återskapandet av konventionella elektroniska system med fotonik en stor utmaning. Som exempel kan nämnas fotoniska beräkningseenheter [4, 5] vilket kommer diskuteras mer i nästa avsnitt.

## TILLÄMPNINGAR

### Kommunikation

Ett område där PIC:s och OFC:er har fått mycket uppmärksamhet under mer än 10 år är informations-



Figur 3. Översikt över huvudsakliga tillämpningsområden för PIC:s med specifika exempel.

överföring, framförallt med avseende på fiberoptisk kommunikation. Fiberoptik tillåter höga dataöverföringshastigheter över långa distanser med låga förluster och utgör den underliggande infrastrukturen för dagens internet. Idag används grupper av lasrar för att ”mata in” data i den optiska fibern, där varje laser utgör en separat bärvåglängd som data kodas in i. Potentialen finns att inte bara ersätta en komplex bank av individuella lasrar med en enskild OFC-källa, utan dessutom att öka mängden bärkanaler i fibern och därmed kraftigt öka dataöverföringshastigheten [3, 6].

Flertalet demonstrationer har gjorts under de senaste åren och i ett samarbete mellan huvudsakligen DTU i Köpenhamn och Chalmers demonstrerades en överföringshastighet på 1.84 Petabyte/s över en 8 kilometer lång fiber [7] – dubbelt så mycket per sekund som överföringsmängden på hela internet under 2020 [3]. Eftersom internettrafiken ökar med ca 20-25% per år så finns ett starkt behov av effektiva höghastighetskommunikationer. OFC-baserade kommunikationslänkar har dessutom möjlighet att minska energiförbrukning och storlek till chip-skala och därmed nyttjas för kortdistanskommunikation i t.ex. superdatorer och datorhallar vilket också kan ge stora effektivitetsvinster i sådan infrastruktur.

Liknande tekniker kan användas även inom kommunikation genom atmosfären med laser istället för fiber. Sådan laserbaserad kommunikation är känslig för atmosfärsförhållanden och turbulens och har

därför kanske störst potential inom rymdområdet för kommunikation mellan satelliter som är svår att signalspana på, samt för effektiv nedlänkning av data från satelliter. Forskning på området bedrivs t.ex. av NASA inom Artemis-programmet [8] och laserkommunikation mellan satelliter implementeras i Starlinkprogrammet<sup>1</sup>.

Även inom annan mobilkommunikation kan PIC:s och OFC:s komma till nytta. 6G-nätet planeras att nyttja högre frekvenser än nuvarande 5G-teknik, med frekvensområde i THz-regimen. Den högre frekvensen möjliggör högre överföringshastigheter och större bandbredd men leder också till högre krav på precision i kalibrering och karaktärisering. OFC-system framstår då som en primär kandidat för att generera stabila THz-frekvenser både som bärvågor och kalibreringskällor [9, 10]. I en militär kontext kan sådan kommunikation med sin drastiskt avkortade räckvidd jämfört med 5G vara användbart för höghastighetskommunikation inom t.ex. stabsplatser [11].

### Tidsmätning & ultranoggrann positionering

I militära sammanhang är position, navigering och tid (PNT) av yttersta vikt för att effektivt kunna operera i alla domäner. Standardtekniken för att säkerställa sådant är globala navigationssatellitssystem (GNSS) som GPS eller det europeiska Galileo-systemet. Sådana satellitbaserade system är känsliga för störning och att stärka GNSS-oberoende PNT är därför högtintressant för Forsvarsmakten och samhället i stort.

Grundläggande för positioneringssystem är extremt exakta klockor med väldigt liten drift över tid. Noggrannheten hos tidsmätningen är i GNSS-system direkt omvänt proportionell mot osäkerheten i position och mycket små faktorer kan ha stor inverkan – man kan exempelvis notera att GNSS-satelliters klockor måste korrigeras för relativistiska tidsfördröjningseffekter eftersom de befinner sig längre bort från jordens masscentrum. Att tillverka högexakta klockor som samtidigt är små och energisnåla är alltså mycket intressant.

Dagens atomklockor är baserade på en så kallad klockövergång i cesiumatomer, alltså en förändring i atomens tillstånd som sker spontant med extremt regelbunden frekvens, som också ligger till grund för

definitionen av SI-sekunden. Den klockövergången ligger i radioområdet vilket gör den väldigt lämplig för sammankoppling med elektronik men begränsar dess precision. Det har senare upptäckts klockövergångar i andra atomer, t.ex. ytterbium och thorium, som istället ligger i det optiska våglängdsområdet. Om en sådan övergång kan nyttjas så kan man i princip öka tidsmätningens precision med en faktor 100. Det är här PIC:s och OFC:s kommer in. Genom att nyttja OFC:s kan man konvertera ljus från optiska frekvenser till mikrovågor som kan styra elektronik. Om detta kan integreras i PIC-format och göras med mikrokammar, så kan det här i princip ge tillgång till atomur på chipskala, dvs. ge tillgång till extremt hög tidsprecision utan att ta upp mycket plats. Det skulle kunna förbättra rymdbaserade GNSS-system, men även mark- och sjöbaserade system om navigering med GNSS antingen störs ut eller inte är möjlig (t.ex. för ubåtar). Man kan notera att forskning inom dessa ämnen sker på t.ex. DARPA [12].

### NEUROMORF HÅRDVARA

En intressant trend inom optiska beräkningar är neuromorf hårdvara, dvs. hårdvara som är designad för att efterlikna hjärnstrukturer. Ursprunget ligger i maskininlärningsmetoder som använder artificiella neuroner, så kallade neurala nät, vilka ligger till grund för mycket av dagens maskininlärningsalgoritmer. Syftet med neuromorf hårdvara är att, istället för att skapa sådana nät i mjukvara, bygga datorer och system med den arkitekturen från början. Detta kan potentiellt leda till stora effektivitetsvinster – särskilt om man kan använda fotonik. Detta är extremt efterfrågat inom t.ex. AI som idag, med mjukvarubaserad arkitektur, är mycket energislukande.

### Beräkningar och effektiv maskininläring

Dagens samhälle ställer extremt höga krav på beräkningsinfrastruktur. Detta har successivt blivit mer problematiskt allteftersom AI-modeller blivit större och tyngre. Stora mängder energi går nu åt till att driva internetkommunikation och AI-beräkningar och efterfrågan ser inte ut att minska [13]. Det finns därav en stark drivkraft för att öka beräkningseffektiviteten och minska energiförbrukningen per operation. Detta är dock utmanande att göra med konventionell elektronik, och rent fysikaliska principer sät-

<sup>1</sup><https://starlink.com/us/technology>

ter idag gränser, speciellt med avseende på värmehantering.

PIC:s utgör en attraktiv teknik för att hantera den här problematiken. Det finns flera anledningar till detta. För det första genererar fotoniska kretsar mycket lite värme vilket betyder att energiförlusterna är låga och därmed även beroendet av extra kylning. För det andra kan fotoniska kretsar nyttja ljusets höga hastighet för att kunna utföra vissa beräkningar extremt effektivt. För det tredje kan man utnyttja våglängdsskillnader för att göra många beräkningar parallellt på samma hårdvara.

Dessa fördelar har gjort att fotonisk implementering av vissa specifika beräkningssteg har fått speciell uppmärksamhet i litteraturen. Framförallt inom maskininlärning för bildklassificering och mer specifikt matris-vektor-multiplikation. För att genomföra såna beräkningar fotoniskt så skickar man ljus genom en serie av vågledare vars transmission kan justeras baserat på den matris man opererar på och i andra änden av vågledarserien kan resultatet avläsas (se t.ex. [13]). Det som gör detta speciellt intressant är att om man kombinerar det med en OFC så kan man göra flera operationer samtidigt – i princip en per linje i frekvenskammen – på samma hårdvara. Det här kan ge extremt energi- och även platseffektiva system. Wang m.fl. (2024) [13] når en energieffektivitet på  $41 \text{ TOPS}$  ( $10^{12}$  operationer per sekund) per W och Yang m.fl. (2025) [14] producerar en enhet för optisk fouriertransformering som når  $305 \text{ TOPS/W}$ . Dessa siffror kan sättas i relation till konventionell elektronik t.ex. NVIDIAs H100 GPU, ett state-of-the-art grafikkort, som når  $0.15 \text{ TOPS/W}$  [13].

Det finns fortfarande stora svårigheter som behöver överkommas – framförallt inom flexibilitet och skalbarhet. Många av de integrerade fotoniska system som presenteras i litteraturen är specialdesignade för en specifik uppgift. Hur man bygger mer generella system som kan anpassas till nya problemformuleringar, helst i mjukvara, är ett av forskningens frontavsnitt idag. På grund av att det problemet är så svårt löst läggs fokus på att effektivisera en specifik del av beräkningen. Detta benämns ofta som fotoniska acceleratorer.

Från ett försvarsperspektiv finns det ett flertal intressanta aspekter med helt fotoniska eller fotonik-accelererade beräkningssystem:

- Högre beräkningskraft med lägre energikrav och

fotavtryck gör att mer avancerade simuleringar kan göras närmare slutanvändaren, exempelvis på stabsplatser.

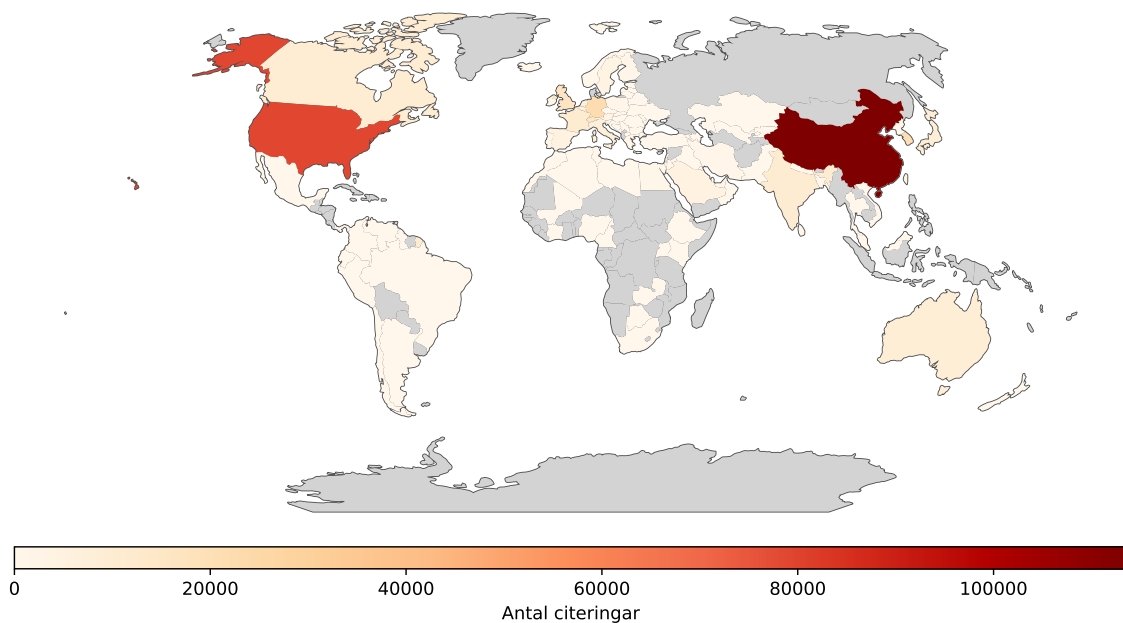
- Lägre energiåtgång för beräkningar kan också nyttjas i framskjutna sensorsystem där energi är en bristvara. Det möjliggör att viss databehandling kan ske innan data skickas från sensorsystemet vilket skulle minska mängden transmitterad data. Detta kan i sin tur både minska upptäcktsrisk och möjliggöra mer komplexa sensorsystem eftersom endast användbar information behöver skickas.
- PIC:s genererar avsevärt mindre värme än konventionell elektronik, vilket potentiellt kan nyttjas för att minska signaturen hos framskjutna system, sensorer etc.
- Fotoniska kretsar är potentiellt också betydligt mer störtlåga för till exempel elektromagnetiska pulser än konventionell elektronik vilket kan förbättra robustheten hos militära system.

## Sensorer

Inom sensorområdet kan PIC:s ha stor utvecklingspotential. Ett tydligt exempel är lidar, som används för avståndsbedömning och objekt-detektion och är en nyckel-teknik för obemannade farkoster. Idag nyttjar lidarsystem typiskt en enskild infraröd laserfrekvens som systematiskt skannar av området och ger information om avstånd genom uppmätning av reflekterat ljus. Genom att implementera en OFC i systemet kan varje isolerad våglängd i kammen användas som en oberoende signalkälla. Man kan alltså skanna av flera delar av scenen samtidigt och därmed potentiellt kraftigt öka uppdateringsfrekvensen på systemet vilket kan vara avgörande vid höga hastigheter [15, 16]. Om OFC:s och laser kan integreras i PIC system kan också lidarsystem bli mindre och energieffektivare, med tydliga försvarsimplikationer för obemannade plattformar.

Mikrovågsdetektion och radarapplikationer kan även de gynnas av att använda fotoniska tekniker istället för elektronik, särskilt i PIC-format. Här finns möjlighet att tillverka mycket känsliga detektorer i liten storlek. Tekniken undersöks aktivt – som ett exempel kan nämnas FOI:s demonstrator av en fotonikbaserad mikrovågsmottagare [17].

OFC:s används även inom absorptionsspektroskopi där deras våglängdsstabilitet kan utnyttjas för



**Figur 4.** Geografisk fördelning av citeringar av artiklar baserat på författarnas universitetstillhörigheter från sökningar på våra 5 sökord i Scopus, från 2020-01-01 – 2025-12-01. Duplicerade artiklar har tagits bort men en artikel kan räknas till flera nationer om författarna har olika anknytningar.

att snabbt karaktärisera beståndsdelarna i luftprov. Laserbaserad spektroskopi har t.ex. använts för att detektera metanläckor vid oljefält [18]. I försvarssammanhang skulle detta kunna nyttjas för snabb detektion av t.ex. kemiska stridsmedel.

Ämnesdetektion kan även göras med så kallade Lab-on-a-chip-applikationer av PIC-teknik. Det kan leda till snabb analys av olika sjukdomstillstånd i fält-situationer där labbfaciliteter är begränsade [19].

## AKTÖRER OCH DRIVKRAFTER

Scopusdatabasen användes för att ytligt kartlägga var den akademiska forskningen bedrivs, med begränsningen från 2020 till 2025 inom 5 relaterade sökord<sup>2</sup>. Den geografiska fördelningen av citeringar baserat på författarnas universitetsanknytningar visas i Figur 4.

Kartan indikerar att fältet domineras av kinesiska forskare, med USA på andra plats. Kina producerade ungefär dubbelt så många publikationer som USA under perioden med ca 50% fler citeringar. Om man istället begränsar tidsperioden till före 2020 är det tydligt att USA då hade en helt dominant position, vilken gått förlorad sedan dess.

Europa befinner sig tydligt efter USA. Den europeiska produktionen domineras framförallt av

<sup>2</sup>Lithium Niobate, Microcomb, Neuromorphic computing, Optical computing, Photonic integrated circuits

Tyskland följt av Storbritannien. Sydkorea är också en stark internationell aktör. Närmare analys av citeringsstatistiken visar att Kina dominerar på grund av sin höga produktionstakt men ligger efter de övriga topp 10 länderna i termer av medelantal citeringar per artikel, med undantag för Indien. Detta skulle kunna indikera en fortsatt lägre forskningskvalitet. Notera att det också skulle kunna resultera från en fortsatt skepticism inom det internationella forsknings-samhället gentemot kinesiska publikationer.

Från undersökningen är det svårt att dra starka slutsatser kring forskningsdominans, men det är tydligt att man kan förvänta sig innovation på området utanför västvärlden och att en bredare bevakning behövs.

För att få en mer komplett bild bör både forskning och produktionskapacitet tas med i analysen. I dagsläget är de mer avancerade typerna av fotoniska komponenter inte i storskalig massproduktion utan produceras av mindre firmor, så kallade photonic foundries, på mer skräddarsydd basis. Foundries tenderar att vara specialiserade inom en viss materialplattform.

I Europa finns ett sedan 1995 ett EU-initiativ, EURORACTICE<sup>3</sup>, som har som uppdrag att agera som mäklare mellan foundries och framförallt akade-

<sup>3</sup><https://europractice-ic.com/>

miker men även startups och dessutom facilitera prototypskapande och småskalig produktion av fotonikkomponenter. Detta kan vara en anledning till att Europa inte ligger lika långt efter inom produktion som i den akademiska litteraturen. Exempelvis rapporterar Electrooptics.com [20] att cirka en tredjedel av foundries fokuserade på kisel-fotonik ligger i Europa och bilden är likartad inom andra stora materialplattformar [21]. Värt att notera är att VLC Photonics rapport [21] visar att europeisk fotoniktillverkning domineras av Tyskland, i linje med den akademiska litteraturen, samt att Sverige tycks halka efter även jämfört med andra nordiska länder som exempelvis Danmark.

### Drivkrafter

Det inns en strukturell drivkraft för utvecklingen av optiska komponenter i allmänhet och PIC:s i synnerhet på grund av den svårighet som finns i att möta dagens beräkningskraftsbehov med traditionella elektroniska lösningar. Tech-industrin utgör idag en ansenlig del av världsekonomin och spenderar stora summor på forskning och utveckling med särskilt fokus på AI-teknik.

Ett konkret exempel på pågående implementering av de här teknikerna är NVIDIA:s satsning på sampaketerade nätverksswitchar, där de nyttjar PIC:s för att kombinera optiska kommunikationskomponenter med traditionell elektronik, för att uppnå högre hastigheter och lägre energiförbrukning för serverhallskommunikation. NVIDIA satsar också brett på kisel-fotonik och har uttalat att de snarare ser sampaketerad optik som ett krav för framtidens datacenter än bara en valfri effektivisering [22, 23].

PIC:s är långt ifrån den enda tekniken som skulle kunna nyttjas för att effektivisera elektronik och snabba upp vissa specifika beräkningar. Andra alternativ inkluderar t.ex. spintronik och biologiska datorer. Till skillnad från många andra alternativa tekniker är PIC:s relativt enkla att integrera med befintlig infrastruktur på grund av den nära relationen med kommunikationssystem som används redan idag. Denna beprövade grundval gör att vi bedömer PIC:s och fotoniska acceleratorer för beräkningsinfrastruktur som en av de mest sannolika framtida utvecklingarna inom beräkningseffektivisering.

### Kullkastare

Det är också viktigt att belysa nyckelsvårigheter och händelseförlopp som kan styra teknikutvecklingen i en ny riktning och göra PIC:s mindre viktiga i ett eller flera av de identifierade tillämpningsområdena. Här lyfter vi fram några sådana risker, men notera att en sådan lista aldrig kan vara komplett.

1. Kollaps av AI-bubblan. Trycket på beräkningsinfrastruktur drivs idag hårt av AI-satsningar från techföretag som NVIDIA, Microsoft och OpenAI. Det finns dock många tecken på att den ekonomiska utvecklingen i det området är instabil. Om denna bubbla kollapsar så kommer det ha mycket stora följder för mängden tillgängliga resurser för FoU-verksamhet och även för trycket på förnyelse av beräkningsteknik med hög prestanda. Det skulle kunna få PIC-utvecklingen att avstanna eller åtminstone försenas.
2. PIC:s är idag svåra att generalisera. Om PIC:s måste specialbyggas för att lösa varje given problemformulering så kommer endast områden där väldigt stora effektivitetsvinster kan nås att prioriteras och tekniken kommer att bli mer exklusiv.
3. Produktion blir svår att skala upp. Om PIC:s inte blir lättare att producera kommer de också, i likhet med förra punkten, bli dyra och exklusiva system som bara integreras i produkter där de gör stor skillnad för prestanda och små effektivitetsvinster prioriteras ner.
4. Alternativa tekniker kommer fram. Om alternativa tekniker med samma målsättning, t.ex. spintronik och biocomputing, når genombrott finns en chans att PIC-teknikens effektivitetsvinster inte kan konkurrera. Man bör notera att PIC:s och spintronikrelaterade tillämpningar är närliggande och utvecklingarna kanske inte är oberoende av varandra.

## REKOMMENDATIONER

Baserat på vår studie och analys drar vi slutsatsen att ämnet är intressant från ett försvarsperspektiv då det potentiellt kan möjliggöra system som är svåra att realisera idag, särskilt inom höghastighetskommunikation, energieffektiv elektronik för framskjutna sensorer och batteridrivna system och högeffektiva sensorer för autonoma plattformar. Baserat på arbetet ges följande rekommendationer:

- Forskningen har signifikanta drivkrafter inom den civila sektorn på grund av tryck från IT-branschen att finna mer effektiva beräkningslösningar. De intressenterna är resurstunga och kommer sannolikt att själva kunna driva forskningen framåt. Specifikt inom beräkningsinfrastruktur ser vi också att militära och civila användningsområden överlappar till väldigt hög grad vilket innebär att renodlad militär forskning inte behövs där. Vi rekommenderar därför att detta område initialt endast bevakas, och bedömer att genombrott inom tekniken kan ske i ett femårs tidsspann. En indikator på ett sådant genombrott är lyckad massproduktion av PIC-chip, förmodligen för användning i storskalig beräkningsinfrastruktur, vilket skulle visa att fältet nått en högre mognadsgrad samt att produktionsproblem har lösts och kostnader kan väntas

sjunka och att fältet bör ges ökat fokus.

- Sensorområdet är väldigt specialiserat och det är osannolikt att militära behov kommer tillgodoses av civil forskning. Därför rekommenderar vi att ett mindre forskningsprojekt vars huvudsyfte är uppbyggandet av kompetens för utvärdering och design av PIC:s inom till exempel radio- och mikrovågssensorer etableras på FOI.
- Vi ser också att kompetens finns inom det svenska forskningssystemet och rekommenderar att prioritera forskningssamarbeten med parter som Chalmers, KTH och RISE för att ta tillvara på den inhemska verksamheten och kompetensen. För att trovärdigt etablera både inhemska och internationella samarbeten behövs egen forskning på ämnet vilket förstärker vår tidigare rekommendation om etableringen av ett forskningsprojekt på FOI.

Under arbetet med detta memo har det dessutom blivit tydligt att det finns starkt intresse för och viktiga beroenden av PNT för försvaret. Vi kan inte hitta några sammanställningar av exakta beroenden och vilka krav på tidsprecision som ställs. Vi ser därför ett behov av att en studie görs för att tydliggöra de militära tidsmätningsskraven för att bättre kunna identifiera nyckeltekniker för att nå dessa krav inom de olika militära domänerna. ■

*Axel Runnholm* fil.dr. i astronomi och analytiker vid enheten för Framtidsstudier.

*Eva Dalberg* fil.dr i fysik och forskningsledare vid enheten för Framtidsstudier.

## REFERENSER

- [1] A. Boes, L. Chang, C. Langrock, M. Yu, M. Zhang, Q. Lin, M. Lončar, M. Fejer, J. Bowers, and A. Mitchell, "Lithium niobate photonics: Unlocking the electromagnetic spectrum," *Science*, vol. 379, p. eabj4396, Jan. 2023.
- [2] A. L. Pyayt, "Guiding Light in Electro-Optic Polymers," *Polymers*, vol. 3, pp. 1591–1599, Sept. 2011.
- [3] B. Corcoran, A. Mitchell, R. Morandotti, L. K. Oxenløwe, and D. J. Moss, "Optical microcombs for ultrahigh-bandwidth communications," *Nature Photonics*, vol. 19, pp. 451–462, May 2025.
- [4] H. Shu, L. Chang, Y. Tao, B. Shen, W. Xie, M. Jin, A. Netherton, Z. Tao, X. Zhang, R. Chen, B. Bai, J. Qin, S. Yu, X. Wang, and J. E. Bowers, "Microcomb-driven silicon photonic systems," *Nature*, vol. 605, pp. 457–463, May 2022.
- [5] B. Bai, Q. Yang, H. Shu, L. Chang, F. Yang, B. Shen, Z. Tao, J. Wang, S. Xu, W. Xie, W. Zou, W. Hu, J. E. Bowers, and X. Wang, "Microcomb-based integrated photonic processing unit," *Nature Communications*, vol. 14, p. 66, Jan. 2023.
- [6] L. K. Oxenløwe, "Optical frequency combs for optical fiber communications," *APL Photonics*, vol. 10, p. 010901, Jan. 2025.
- [7] A. A. Jørgensen, D. Kong, M. R. Henriksen, F. Klejs, Z. Ye, O. B. Helgason, H. E. Hansen, H. Hu, M. Yankov, S. Forchhammer, P. Andrekson, A. Larsson, M. Karlsson, J. Schröder, Y. Sasaki, K. Aikawa, J. W. Thomsen, T. Morioka, M. Galili, V. Torres-Company, and L. K. Oxenløwe, "Petabit-per-second data transmission using a chip-scale microcomb ring resonator source," *Nature Photonics*, vol. 16, pp. 798–802, Nov. 2022.
- [8] NASA, "Lasers Light the Way for Artemis II Moon Mission." [https://esc.gsfc.nasa.gov/news/Lasers\\_Light\\_the\\_Way\\_for\\_Artemis\\_II\\_Moon\\_Mission](https://esc.gsfc.nasa.gov/news/Lasers_Light_the_Way_for_Artemis_II_Moon_Mission), June 2021.
- [9] D.-C. Shin, B. S. Kim, H. Jang, Y.-J. Kim, and S.-W. Kim, "Photonic comb-rooted synthesis of ultra-stable terahertz frequencies," *Nature Communications*, vol. 14, p. 790, Feb. 2023.
- [10] G. Kang, Y. Lee, J. Kim, D. Yang, H. K. Nam, S. Kim, S. Baek, H. Yoon, J. Lee, T.-T. Kim, and Y.-J. Kim, "Frequency comb measurements for 6G terahertz nano/microphtonics and metamaterials," *Nanophotonics*, vol. 13, pp. 983–1003, Mar. 2024.
- [11] K. Wiklundh, G. Bark, G. Eriksson, K. Fors, and P. Holm, "60 ghz in military use cases," tech. rep., Totalförsvarets forskningsinstitut, 2024.
- [12] DARPA, "SUNSPOT: Sources for Ultraviolet Nuclear Spectroscopy of Thorium." <https://www.darpa.mil/research/programs/sunspot>, June 2025.
- [13] D. Wang, Y. Nie, G. Hu, H. K. Tsang, and C. Huang, "Ultrafast silicon photonic reservoir computing engine delivering over 200 TOPS," *Nature Communications*, vol. 15, p. 10841, Dec. 2024.
- [14] H. Yang, N. Peserico, S. Li, X. Ma, R. L. T. Schwartz, M. Hosseini, A. Babakhani, C. W. Wong, P. Gupta, and V. J. Sorger, "Near-energy-free photonic Fourier transformation for convolution operation acceleration," *Advanced Photonics*, vol. 7, Sept. 2025.
- [15] J. Riemensberger, A. Lukashchuk, M. Karpov, E. Lucas, W. Weng, J. Liu, and T. J. Kippenberg, "Massively parallel coherent LiDAR using dissipative Kerr solitons," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, (Washington, DC), p. SM2N.2, Optica Publishing Group, 2020.
- [16] A. Lukashchuk, J. Riemensberger, M. Karpov, J. Liu, and T. J. Kippenberg, "Megapixel per second hardware efficient LiDAR based on microcombs," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, (San Jose, California), p. AW3S.2, Optica Publishing Group, 2021.
- [17] F. Kullander, "Studie av fotonikmottagare för radiofrekvenser upp till 40 GHz," May 2025.
- [18] C. B. Alden, S. Ghosh, S. Coburn, C. Sweeney, A. Karion, R. Wright, I. Coddington, K. Prasad, and G. B. Rieker, "Methane leak detection and sizing over long distances using dual frequency comb laser spectroscopy and a bootstrap inversion technique," Oct. 2017.
- [19] J. C. Ramirez, D. Grajales García, J. Maldonado, and A. Fernández-Gavela, "Current Trends in Photonic Biosensors: Advances towards Multiplexed Integration," *Chemosensors*, vol. 10, p. 398, Sept. 2022.
- [20] "Blossoming photonic foundries." <https://www.electrooptics.com/analysis-opinion/blossoming-photonic-foundries>.
- [21] "VLC photonics Technical reports." <https://www.vlcphotonics.com/technical-reports/>.
- [22] A. Shilov, "Nvidia outlines plans for using light for communication between AI GPUs by 2026 — silicon photonics and co-packaged optics may become mandatory for next-gen AI data centers." <https://www.tomshardware.com/networking/nvidia-outlines-plans-for-using-light-for-communication-between-ai-gpus-by-2026-silicon-photonics-and-co-packaged-optics-may-become-mandatory-for-next-gen-ai-data-centers>, Aug. 2025.
- [23] "NVIDIA Announces Spectrum-X Photonics, Co-Packaged Optics Networking Switches to Scale AI Factories to Millions of GPUs." <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-spectrum-x-co-packaged-optics-networking-switches-ai-factories>, Mar. 2025.