

TEKNISK PROGNOSEN

RAPPORT NR 2 • 2022

TEMA: HALVLEDARE

HALVLEDARNA FINNS ÖVERALLT I VÅR VARDAG
OCH FÖRSVARET KLARAR SIG INTE UTAN DEM

HALVLEDARE – FRÅN GRUNDEN
TILL ELEKTRONERNAS INRE LIV

HÖGTEKNOLOGIN ÄR DEN NYA OLJAN
UKRAINAKRIGET VISAR PÅ DESS BETYDELSE

SVERIGE HAR ETT VIKTIGT ARV ATT FÖRVALTA
MEN FORSKNING KRÄVER TÅLAMOD

INNEHÅLL

Försvaret och samhället är helt beroende av halvledartechniken	4
Halvledarna finns överallt i vår vardag	6
Bra forskning är som ett bra stafettlag	12
Carl-Mikael tröttnar aldrig på kiselkarbid	20
Kiselkarbid vinnare efter 30 års forskning	22
Ett samhälle med högre spänning	26
MIT-forskare om framtidens elektronik	32
Högoddsare i Kista skapar detektorer för världen	46
Chippen håller planen i luften	52
Trenderna som styr utvecklingen	54
Sveriges säkerhet blir mer beroende av halvledartechnik	60
Bra idéer ger nya pengar	64
Här vävs framtiden med nanotrådar	68
Kriserna avslöjar bristen på beredskap	74
Hållbara innovationer	80
Halvledarskola	84
• Halvledarens förhistoria	86
• Dopning och vägen till transistor	88
• Dioden – halva vägen till BJT-transistor	89
• Vägen till BJT-transistor	90
• MOSFET-transistor	92
• Tillverkning av halvledarchip	94
Förkortningar och begrepp	96

FÖRSVARET OCH SAMHÄLLET ÄR HELT BEROENDE AV HALVLEDARTEKNIKEN

Att halvledarkomponenter är viktiga i vårt samhälle har nog inte undgått någon vid det här laget. Att moderna vapen är beroende av chip, data och mjukvara är heller ingen nyhet. Det var inte svårt att fatta beslut om att göra en djupare analys på området halvledarteknik. Förstår vi halvledarna kanske vi kan förstå framtidens möjligheter och hot bättre?

Angreppssättet har varit brett. Temat är halvledarteknik i bred bemärkelse. Att det var strategiskt viktigt stod klart från början men alltefter som arbetet pågått framstår området som alltmer strategiskt, så strategiskt och viktigt att vi kan inte leva utan dessa halvledare. Hela vårt samhälle och ekonomi är helt uppbyggt på halvledartekniken. Utan halvledare kan vi inte förflytta oss, inte kommunicera, inte värma upp våra hus – och framförallt inte försvara oss mot en kvalificerad motståndare.

»Hela vårt samhälle och ekonomi är helt uppbyggt på halvledartekniken. Utan halvledare kan vi inte förflytta oss, inte kommunicera, inte värma upp våra hus – och framförallt inte försvara oss mot en kvalificerad motståndare.«

Det breda angreppssättet har tydligt visat att halvledarteknik är helt avgörande inom i princip alla områden i vårt moderna samhälle.

Avsikten med denna tekniska prognos på halvledarområdet är att ge en överblick och förståelse för vad en halvledare egentligen är och vilka användningsområden tekniken har. Kompetenser kring design och produktion av halvledare är en viktig hörnsten i all form av systemutveckling, militär som civil. Nya förmågor på slagfältet realiserar i en eller flera samverkande system. Dessa system designas med ett antal önskade egenskaper vilka till stor del realiserar med hjälp av halvledarkomponenter.

Att ha en viss förståelse för halvledaren är viktigt för att förstå framtidens möjligheter men också risker på slagfältet. Beroendet av ny fantastisk teknik som bygger på olika it-produkter betyder i sin tur ett beroende av tillgång till energi (utan en strid ström av elektroner som far runt i halvledarna är det bara en bit dum metall) och information. Teknikberoendet skapar också risker. Kan vi inte inhämta precis och korrekt information och underrättelser snabbt så får precisionsvapnen ingen större betydelse. Blir systemen utstörda eller hackade blir de obrukbara.

Information och tid är viktiga faktorer på slagfältet. Snabba informationsflöden medger snabbare beslut som resulterar i snabbare insatser med rätt verkan. Avancerade chip med avancerad logik möjliggör autonoma och intelligenta vapensystem. Den som har tillgång till och kunskap om framtidens halvledarteknik som

AI-chip får ett övertag. Vi kan behålla initiativet och motståndaren trycks tillbaka i ett reaktivt uppträdande.

Förhoppningen är att denna tekniska prognos ska ge en ökad förståelse och medvetenhet kring halvledarens roll i framtidens försvarssystem. Vi fokuserar mer på att förklara tekniken och vilka möjligheter den ger och vad som finns att tillgå i Sverige, än riskerna.

Prognosen bygger på ett antal intervjuer med auktoriteter inom sina områden, både forskare och företagare. I rika illustrationer beskrivs grundläggande halvledarteknik och möjliga användningsområden. I slutet (se sid 60) återfinns en analys och prognos om framtiden som utgår ifrån ett antal frågeställningar. □



Mikael Schönström,
fil.dr. FMV
mikael.schonstrom@fmv.se
Projektledare Omvärldsbevakning
med teknisk prognos.

»Den som har tillgång till och kunskap om framtidens halvledarteknik som AI-chip får ett övertag. Vi kan behålla initiativet och motståndaren trycks tillbaka i ett reaktivt uppträdande.«



HALVLEDARNA FINNS ÖVERALLT I VÅR VARDAG

Om Sverige skulle kora en *mister halvledare* så skulle Mikael Östling ligga bra till. Mer formellt är han professor i fasta tillståndets fysik och prorektor vid Kungliga tekniska högskolan i Stockholm, KTH. Samt inte minst drivande bakom Electrum, KTH:s laboratorium i Kista.

När det blev stilla i bilfabrikerna vaknade till och med politikererna. Fordonsbranschen förstod inte vad en brist på halvledare skulle få för verkningar. Man saknade en plan B. Och en sådan måste man ha liksom en plan C. Man måste vara snabbfotad och förstå vad som är alternativen. För att klara detta krävs specialister. Det gäller även för det svenska försvaret. Man måste förstå teknikens grunder och vad det kan bli brist på och vad man gör då, säger Mikael Östling och pekar upp i taket.

– Det finns halvledare överallt. Det här rummet är fullt av LED-lampor och de är halvledare.

Vägen till halvledaren bottnar i människans urgamla behov av att kunna räkna. När fingrarna inte räckte tog man till kulramen. Siffror kunde uttryckas på olika sätt. Den binära metoden bygger på ettor och nollor. Alla tal kan beskrivas som långa rader av ettor och nollor och datorn använder det binära språket för att göra siffror.

– Man kan se ettorna och nollorna som en kondensator som antingen är laddad eller oladdad. Det är det enda den kan. Det går fort att ladda i och ur i

den digitala tekniken. Men människan och världen i övrigt är analog. Det är lite ljusare eller lite mörkare, men inte av eller på. Man mäter ljuset och digitaliserar signalen. Datorn kan bara räkna ettor och nollor och elektroniken förvandlar den analoga världen till digital. Den omvandlingen kostar energi. Vi vill ha det snabbare och strömsnålare, men vi är aldrig nöjda. Så nästa generation har dubbelt så mycket minne. Det är det fantastiska. Det finns så många olika nivåer när man talar om elektronik, men man kommer inte ifrån att det krävs ett minne för signalerna.

Att vara av eller på

I denna enorma utveckling – på 1950-talet motsvarade 5 Mb en jättehög av hålkort – spelar halvledarna en central roll.

– De kan styras och kontrolleras. Läger man på en spänning flyttas elektroner från det så kallade valensbandet till ledningsbandet och det uppstår en elektrisk ström. Läger man på en liten spänning så händer ingenting. En liten spänning på en metall ger ändå en liten ström. Bilden är så klart förenklad, men det handlar i grunden om att det ska vara av eller på, säger Mikael Östling.

– I halvledarvärlden regerar kisel. ▷

Det oxiderar naturligt i rumstemperatur. Kiseloxid är en av de bästa isolatorerna vi har och det är en av huvudanledningarna till att kisel har denna dominerande ställning. Men vi tittar inte bara på kisel utan även på andra prestationshöjande ämnen, säger Mikael Östling. Många av dessa ämnen är inte ensamma utan man blandar dem med kisel för att få speciella egenskaper. Germanium är ett sådant ämne. När jag började med det här valde man främst mellan fem olika ämnen. I dag har man halva periodiska systemet i kretsen. Det har gett en komplex teknologi där mekaniska spänningar ger elektroniska egenskaper.

– Man måste ha både specialmaterial som klarar de svåra grejerna, men som är dåliga på databehandling och kisel som är bra på detta.

Konservativ bransch

Ett specialmaterial är kiselkarbid (se sid 19) som tål väldigt höga temperaturer och som är idealiskt i komponenter för kraftelektronik.

– Det här är en förutsättning om vi ska lyckas att gå mot en grönare värld, säger Mikael Östling. När allt ska elektrificeras ökar behovet av halvledarteknik och krafthalvledare dramatiskt. Boxarna i t-banan som omvandlar högspänning till lågspänning kan spara 30–40 procent i energiförbrukning om man går över till kiselkarbidkomponenter och konstruerar om boxen efter detta. Dyrt i början, men det lönar sig rätt snart.

– Världen lär konsumera 26 000 terrawattimmar om året i elektricitet. Om några år är siffran den dubbla. En enprocentig förbättring av effektiviteten motsvarar ett hundratal ostartade kolkraftverk på 500 megawatt.

Det kan ju tyckas vara självklart att satsa på energisnål teknik även om det kostar i början. Men komponentvärlden är inte heller mycket för att chansa.

– Det är världens mest raffinerade bransch, men också väldigt konservativ. Man ändrar inte design och komponenter utan kniven på strupen. Det är de säkra hästarna som gäller. Att bygga en ny fabrik kan kosta flera hundra miljarder dollar. Då är det inte läge att satsa på något nytt. Även bjässarna går i konkurs om de satsar fel.

– Vi håller på med många olika saker på Electrum som material som ger ljus och teknologi som gör mikrovågor, krafthalvledare och högtemperaturtillämpningar. En stor del av arbetet är av en annan sort och det handlar om att skapa infrastrukturer för forskning. KTH och Chalmers är de dominanta spelarna i branschen och även externa kunder kan komma till, säger Mikael Östling.

– Det finns nog inte på så många håll i världen där man kombinerar akademien med företagsbyggande. Ungdomar studerar här, går kanske vidare med forskarutbildning, bildar forskargrupper som kan bli företag om det finns pengar. Att få fram pengar är dock inte lätt. Det krävs modeord. Det måste vara något annorlunda. Har man inte skrivit mycket i ett ämne minskar det chansen att få pengar. Har man skrivit mycket i samma ämne kan man få höra att ämnet har fått så det räcker. Är man tillräckligt fin och upphöjd kan man, något överdrivet uttryckt, räkna med anslag.

Om pengarna kommer och forskning- en går bra kan företagen växa ur huset eller säljas och en del blir kvar i Sverige. Den vägen gick Kiselkarbid i Stockholm, Kisab (se sid 22) och IR-Nova (se sid 46) som gör alla sina halvledare i vårt labb.

Internationell miljö

Det slående i Electrum är den även för Kista internationella miljön. Var har ingenjörsländan Sverige tagit vägen?

– Vi har fortfarande kunskap och talang i det här landet men svenska ungdomars intresse för halvledare har minskat. Det ser vi på antagningarna till de internationella masterprogrammen på KTH och Chalmers. För 20 år sedan behövde ingen prata engelska, nu är det ingen som pratar svenska. Lärarna har också internationell bakgrund. Ungdomarna är mästare på

»Halvledartekniken är en av grundbultarna för att skapa ett hållbart Sverige. Vi borde snacka mindre om halvledarna och mer om att vi skapar det hållbara samhället.«



att använda tekniken, men förstår inte varför det blir som det blir.

En anledning till ointresset är möjligen den allmänna trenden att naturvetenskapen går ned. Matematiken skrämmer. Hur ska man då locka ungdomen?

– Hållbarhet, säger Mikael Östling. Det är det som är grejen. Halvledartekniken är en av grundbultarna för att skapa ett hållbart Sverige. Vi borde snacka mindre om halvledarna och mer om att vi skapar det hållbara samhället.

Mikael Östling understryker att Sverige fortfarande har massor av häftiga företag som man kanske inte tänker på som ingenjörsföretag, som till exempel Spotify. Men konkurrensen är stenhård och vi behöver ständigt nya ingenjörer. Företagen måste förstå att det handlar om vår framtid, annars försvinner kompetensen. Företagen anser nog att det är för svårt med halvledare

och har inte gjort något för att ändra på detta.

Ingenjörsländan skulle bli ett it-land och den resan har väl gått upp och ned.

– Min dröm är att starta något i stil med batterifabriken i Västerbotten. Ett nationellt projekt som ska bli en stor grej där den svenska profilen är billigt och enkelt. Projektet ska tjäna samhället och gå att göra pengar på. Man ska inte glömma att elektronikbranschen står för en femtedel av världsekonomin. Vi skulle kunna tillverka krafthalvledarkomponenter i bredbandsmaterial som kiselkarbid och galliumnitrid. Fabriken skulle visserligen kosta några miljarder men bara någon tiondel av jättefabrikerna. Fordonsindustrin och kraftindustrin borde vara tydliga intressenter. Fabriken kan mycket väl ligga i Sverige. Robotarna och de avancerade maskinerna är lika dyra här som överallt och arbetet är ju mycket

automatiserat så arbetskostnaden talar inte längre lika starkt för att ha fabriken i Asien.

Och framtiden? Genombrott eller den vanliga lunken?

Det är ett halvsekel sedan den integrerade kretsen kom och ingenjörsvetenskapen lever vidare. Det är ständiga förbättringar, men jag ser knappast ett genombrott vid horisonten. Ingenjörerna tar hela tiden nya steg.

Ständiga förbättringar är nästan som små genombrott i sig. Ingenjörerna och forskarna har under hela denna halvledarperiod lyckats lösa alla dessa, till synes, omöjliga teknikhinder på ett elegant sätt. Men kom alltid ihåg att alla lösningar måste kunna räknas hem ekonomiskt.

Kisel behåller sin särställning. Nya spännande ämnen som grafen blir ett komplement men gör ingen revolution. □

Detta är halvledare

Din dator eller din smartphone drivs av ett tunt lager kristallint kisel täckt med många miljarder transistorer, allt sammansatt till ett halvledarchip. Ordet "halvledare" har kommit att användas både för själva halvledarmaterialet – det vill säga kisellagret som transistorerna byggs på – men även för hela chippet, eller halvledarkomponenten. Så när man talar om halvledare kan man syfta på två saker.

1. Halvledarmaterial

Halvledarmaterial är kristallina material som inte leder elektrisk ström lika bra som en ledare (t ex. koppar eller järn), men inte heller utesluter att leda ström som en isolator. Det var dessa unika egenskaper hos halvledarmaterial som fick ingenjörer att börja finjustera ledningsförmågan i halvledarmaterialen och skapa små komponenter som kunde styra strömmen genom en krets på önskat sätt. De tre materialkategorierna kan liknas vid en bro som kan öppnas och stängas i olika grad.



2. Halvledarkomponenter

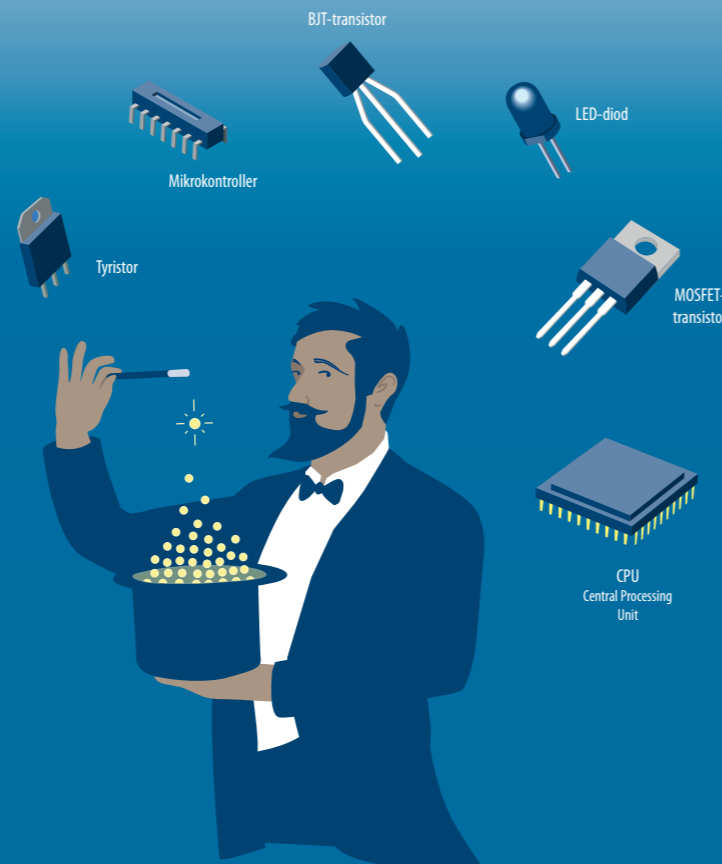
På halvledarmaterial byggs alltså halvledarkomponenter. Först ut var dioden och transistorn. Den sistnämnda har helt förändrat kursen för mänskligheten sedan den uppfanns 1947. Men det finns många olika typer av halvledarkomponenter, spännvidden är enorm.

Diskreta komponenter

Dessa är enskilt kapslade elektroniska komponenter, exempelvis en diod, en transistor eller tyristor. De kopplas samman med andra komponenter för att få önskad funktion t ex på ett kretskort. Även en enskild LED-diod är en diskret komponent.

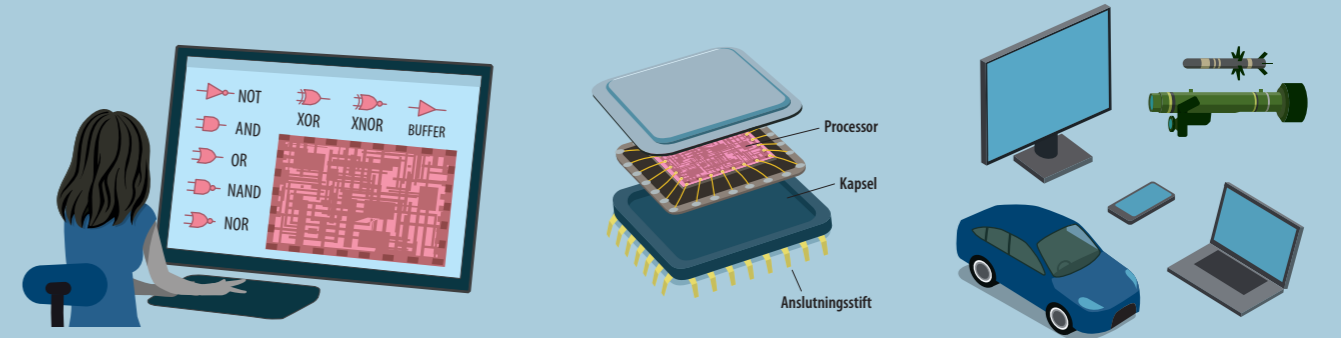
Integrerade kretsar

Allt från små mikrokontroller som styr din kaffekokare till den senaste datorprocessorn packad med över 50 miljarder transistorer. Så länge det är två eller fler integrerade komponenter på ett chip talar man om integrerade kretsar.



Transistorer och logiska grindar...

Halvledarkomponenternas superstjärna är transistorn och den kommer i många olika varianter beroende på användningsområde. I sin barndom användes den till att förstärka svaga elektriska signaler, men även till att räkna "ettor" och "nollor" i det binära talsystemet, snabbare och ström-snålare än de otympliga vakuumrören som användes i de första datorerna. Transistorerna fungerar som strömbrytare för de logiska grindar som bygger upp logiken i alla processorer och minneskretsar i dagens datorarkitekturer.



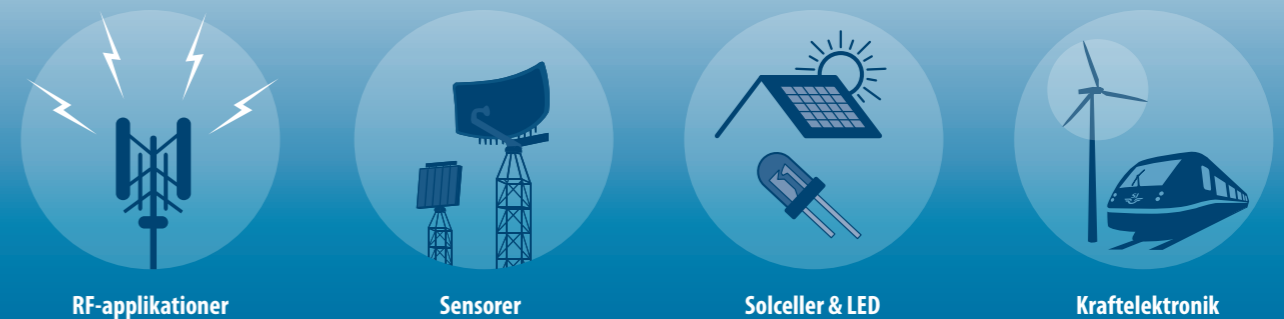
Designen av en halvledarkomponent som exempelvis en processor eller minneskrets kräver avancerade specialprogram. Här kombineras transistorer till olika typer av logiska grindar för att bygga upp komponentens funktioner. En modern processor kan innehålla miljardtals logiska grindar.

När designen är klar tillverkas halvledarkomponenten i en halvledarfabrik och monteras i en kapsel med anslutningsstift (se sidorna 94–95).

De färdiga komponenterna monteras i olika typer av produkter. En modern bil kan innehålla 1 500 halvledarkomponenter, ett Javelin-robotssystem över 250.

...och allt det andra

Men halvledarkomponenter är mycket mer än processorer och minneskretsar. Mängder av halvledarkomponenter används som aktiva enheter i analoga tillämpningar som sensorer och RF-teknologier som radio och radar. Solceller och LED-lampor är i grunden halvledardioder och även inom kraftelektronik används halvledarkomponenter för olika omvandlingsprocesser av elektricitet.

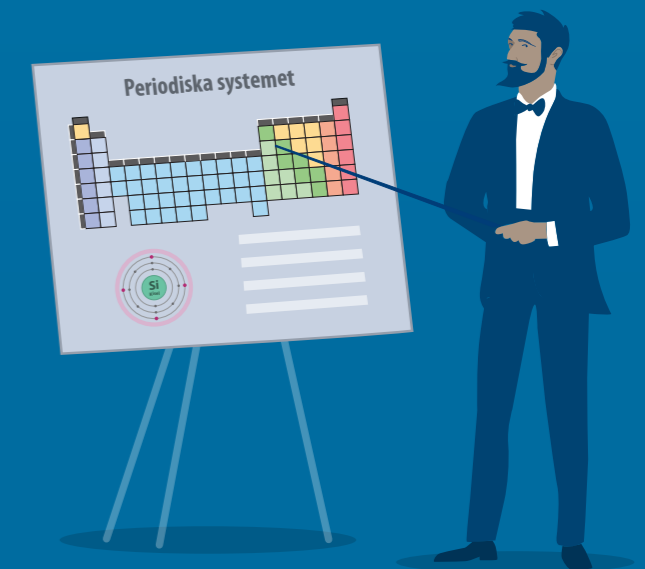


Halvledargrunder

Halvledarfysik är komplicerat. Det är lättare att förstå vart halvledarteknologin är på väg om man har en grundläggande förståelse kring det fasta tillståndets fysik.

I slutet av dokumentet, från sida 84, ligger därför ett antal illustrationer som reder ut de viktigaste begreppen. Vi går igenom begreppen bandgap, dopingprocessen, pn-övergångar och funktionen hos halvledarkomponenter som dioden och transistorn. Vi reder också ut begrepp som BJT, MOSFET och CMOS och hur tillverknig av kiselkomponenter går till.

På sidan 96–97 finns en ordlista med vanliga förkortningar, och begrepp.



BRA FORSKNING ÄR SOM ETT BRA STAFETTLAG

Att ta hissen i en byggnad på Campus Johannesberg vid Chalmers är som att åka i ett högteknologiskt varuhus. Vid avdelningen för mikrovågselektronik arbetar professor Herbert Zirath och forskaren Niklas Rorsman. Bra forskning är som ett bra stafettlag. Det räcker inte med att springa bra på sträckorna, man måste kunna växla bra också. Forskarna på ett område ska kunna lämna över till andra forskare och då måste man förstå deras område. Man bör lämna hissen ibland på fler våningar än sin egen.

Herbert Ziraths specialitet är mikrovågselektronik och han arbetar tillsammans med Ericsson.

Niklas Rorsman forskar i mikroteknologi och nanovetenskap. Han säger att det behövs både specialister och generalister.

– Man behöver de som kan lite av varje. Därför arbetar vi med systemföretag som Ericsson och Saab. På det viset lär vi om system och det skulle behövas fler systemmänniskor. Man skulle vilja arbeta mer med det övergripande, men det är samtidigt mycket svårare. Verkligheten klickar in på ett helt annat sätt.

Mästare i labbet

Det som fungerar bra i labbet klarar inte alltid mötet med verkligheten. Varje område kräver hög kompetens. Det är inte lätt att hålla en hög nivå över hela bredden och i skarvarna mellan områden kan det bli glapp.

– Hur går man från ett visst material så att det blir en bra enhet och hur går man från enhet till kretsar.

Herbert Zirath säger att forskare måste förstå fler områden än sitt eget. Vi vill inte ha ett stafettlag där man springer bra på sträckorna, men missar växlingen.

– De flesta forskare är bara intresserade av att få högsta möjliga datatakt på labbänken. Det handlar mer om att slå rekord och det forskas för lite på att få det att fungera i system. En viktig

del är att designa kretsarna och det kräver specialkunskaper.

Herbert Zirath säger att man försöker att arbeta med andra som har tillämpningar på systemnivå som Saab och Ericsson.

– Vi har försökt att ligga före och övertyga företag om att det här är något. Och ibland har vi lyckats. Saab och Ericsson har egen forskning och vi arbetar tillsammans i gemensamma projekt. Företagen har frågeställningar och vi pekar på intressanta vägar. Företagen ger oss inspiration att forska vidare. Vi gör kärntekniken. När infrastrukturen väl är på plats så kommer applikationerna. Problemet är att om det saknas applikationer så finns det inte motiv att satsa på tekniken och det här är Ericssons och Saabs dilemma. Vad ska den nya tekniken användas till? Mitt svar är att det kommer saker som vi idag inte har en susning om.

Det som driver forskningen är

enligt Herbert Zirath det framtida samhällets behov.

– Det är trångt i etern. Vill man ha nya applikationer för sensorer, självkörande bilar och allt möjligt måste man söka sig till de högre frekvenserna och lära sig att designa kretsar för de frekvenserna. Med Ericsson arbetar vi med frekvenser över 100 GHz. Ju högre frekvens desto större bandbredd och desto fler bitar per sekund.

Behövs 5G? Nu talas det redan om 6G. – På 1800-talet tyckte man att semaforer var tillräckliga. Men människan vill alltid gå framåt och finns det en utveckling så kommer applikationerna. Höga datatakt och korta svarstider behövs för självkörande bilar. Utvecklingen går framåt och vi är inne i den vare sig vi vill eller inte. Det kommer hela tiden nya grejer. Ett stort område just nu är att använda samma hårdvara och frekvenser för sensorer och kommunikation. ▸

»På 1800-talet tyckte man att semaforer var tillräckliga. Men människan vill alltid gå framåt och finns det en utveckling så kommer applikationerna. Utvecklingen går framåt och vi är inne i den vare sig vi vill eller inte. Det kommer hela tiden nya grejer.«





Det blir som en universalsmaskin. En drivkraft är att det behövs radarsensorer för bilar. Radcom är ett projekt vi arbetar med. Det är mycket forskning på vågformer.

– Vi ser en framtid där väldigt mycket data ska skyfflas fram och tillbaka, säger Niklas Rorsman. I en automatiserad fabrik ska allting mätas och kontrolleras mellan sensorer, sändare och mottagare.

Den gamla treenigheten

När Herbert Zirath var doktorand var hans studier till största delen finansierade av Försvarets materielverk, FMV. Det fanns då en treenighet mellan Chalmers, FMV och Försvarets forskningsanstalt, FOA – som sedan blev FOI.

– Det känns som om försvarselektroniken har minskat de senaste decennierna. Minskar anslagen så går forskningen ner. Inom mitt område har generellt intresset för millimetervågor ökat enormt. Det är den kommersiella sidan som håller forskningen uppe när försvaret dragit ned.

– Det amerikanska försvaret har inte gått samma väg. Darpa satsar mycket på att få fram ny forskning. Det är en finansiär som vet vad den vill och någon motsvarighet till Darpa har vi ju inte i Sverige. Generalerna tittar på Stjärnornas krig och pekar på grejer som de vill ha.

– Sverige har en bra halvledarforskning, men har ingen industri som tillverkar halvledarna. Det skulle vara pricken över i, säger Niklas Rorsman. Det skulle behövas ett företag som Ericsson eller Saab på halvledarområdet. Ericsson hade den stafett-pinnen på 1980-talet. Men det blev nog för dyrt tyckte man. Utvecklingen gick så fort att dyra maskiner snabbt blev omoderna i jakten på högre prestanda.

Vad låg bakom den höga svenska ambitionen?

– Till viss del var det nog eldsjälarna som drev på. Sven Ingmar Ragnarsson på dåvarande Nutek, som föregick Vinnova, var engagerad i mikroelektronik och det blev mycket forskning



Nanotekniklaboratoriet är en renrumsanläggning för forskning och utveckling inom mikro- och nanoteknik. Här finns ett brett utbud av utrustningar för att utveckla och testa nya idéer på mikro- och nanoskala.

på halvledarbaserade komponenter. Forskningen finns kvar, men det blev nog inte så kommersiellt som man då hoppades. På FMV fanns Gunnar Eriksson. Han ville att svensk försvarsindustri skulle ha en svensk komponentleverantör. Han ansåg att det var en strategisk resurs. Det är åtminstone den uppfattningen som jag som ung doktorand fick.

Och nu saknas det pengar.

– På högskolorna finns inga pengar, säger Niklas Rorsman. Forskarna tillbringar en stor del av sin tid med att söka anslag. □

»Minskar anslagen så går forskningen ner. Inom mitt område har generellt intresset för millimetervågor ökat enormt. Det är den kommersiella sidan som håller forskningen uppe när försvaret dragit ned.«

Väletablerade halvledare

På följande två uppslag presenteras ett antal halvledarmaterial med kisel och galliumarsenid som de stora väletablerade arbets-hästarna. Men dessa två material börjar få konkurrens och flera nya kandidater står i kulissen och löser redan idag vissa uppgifter bättre, snabbare och på längre sikt troligen billigare.

Kisel – Si

Bandgap
1,12

Kisel är fortfarande den ohotade giganten bland halvledarmaterial och används till i stort sett all halvledarbaserad elektronik men teknologin börjar nå gränsen för sin utvecklingspotential.

Traditionellt, drivs forskning och innovation för högre prestanda med III-V-halvledarmaterial som Galliumarsenid (GaAs), Galliumnitrid (GaN) och Indiumfosfid (InP). Men efter en tid har oftast Kiselgermanium SiGe-HBT (se nästa sida) och så småningom Kisel-MOSFET teknologierna hunnit ikapp utvecklingen. Kisel-MOSFET:s stora fördel – att kunna integreras och produceras i stora volymer – har ingen annan teknologi kommit i närheten av. Därtill kommer hela ekosystemet av processteknologi, design, test och så vidare, som stöder nya generationer kiselteknologi. Dessa fördelar gör det oftast värt att designa sig runt eventuella problem snarare än att byta ut den kostsamma värdekedjan.

Vad kisel inte klarar så bra

Men det finns några områden där Kisel-MOSFET har svårare att konkurrera. Listan nedan visar några exempel inom framför allt analog elektronik – samt vilken teknologi som används istället.

- RF-effekt, lågt brus – **GaAs HEMT**
- Höghastighets elektronik (t ex radar, signalprocessorer) – **SiGe HBT/BiCMOS**
- Lågbrus – **InP HBT/DHBT**
- RF effekt, robust elektronik, DC kraftelektronik – **GaN HEMT**

Kiselwafers används även som substrat på vilka man med olika tillväxtmetoder – som epitaxi – växer andra halvledarmaterial. Ett exempel är galliumnitrid.

Galliumarsenid – GaAs

Bandgap
1,43

Galliumarsenid är det näst vanligaste halvledarmaterialet efter kisel och den riktiga arbetshesten inom mikrovågsdesign och används då med olika typer av HEMT och HBT teknologier (se nedan).

GaAs har vissa elektroniska egenskaper som gör det bättre än kisel såsom högre elektronrörlighet, vilket möjliggör drift i så höga frekvensband som 250 GHz. GaAs-kretsar genererar också mindre brus än kisel när de drivs i höga frekvenser.

Många användningsområden

GaAs kan även användas med hög effekt eftersom det har högre genomslagsspänning än kisel. Dessa egenskaper gör GaAs särskilt lämpat för kretsar i mobiltelefoner, satellitkommunikation, mikrovågs-länkar och vissa radarsystem.



Upp till
1 THz

GaAs används också vid tillverkningen av gunnioder, vilka används för att skapa mikrovågor samt schottkydioder som används för millimetervågsinstrument till klimatforskning och vädersatelliter.

Höga dataakter och lågt brus

Kiselgermanium – SiGe

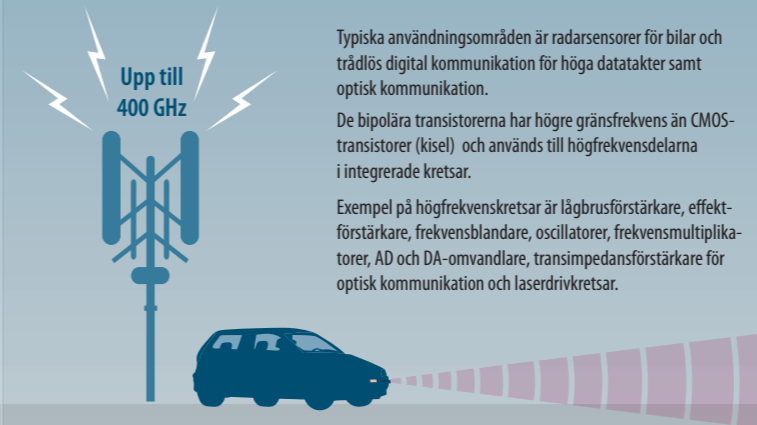
Bandgap
(flexibelt)

Kiselgermanium är en kiselteknologi i grunden. Den erbjuder möjligheter inom design och tillverkning av kretsar med blandade signaler och analoga kretsar. Materialet tillåter också mycket höga dataakter.

SiGe tillåter HBT-transistorer (se nedan) att integreras med CMOS-logik – till så kallade BiCMOS – (Bipolar CMOS), vilket gör den lämplig för kretsar med blandade signaler.

Flexibelt bandgap

HBT-transistorer har hög framåtförstärkning och låg backförstärkning. Detta leder till bättre lågströms- och högfrekvent prestanda. Eftersom SiGe är en heterojunction-teknologi (se förklaring nedan) med ett justerbart bandgap, erbjuder SiGe möjligheten till mer flexibel bandgapinställning än ren kiselteknologi.



Upp till
400 GHz

Typiska användningsområden är radarsensorer för bilar och trådlös digital kommunikation för höga dataakter samt optisk kommunikation.

De bipolära transistorerna har högre gränshänsen än CMOS-transistorer (kisel) och används till högfrekvensdelarna i integrerade kretsar.

Exempel på högfrekvenskretsar är lågbrusförstärkare, effekt-förstärkare, frekvensblandare, oscillatorer, frekvensmultiplikatorer, AD och DA-omvandlare, transimpedansförstärkare för optisk kommunikation och laserdrivkretsar.

Indiumfosfid – InP

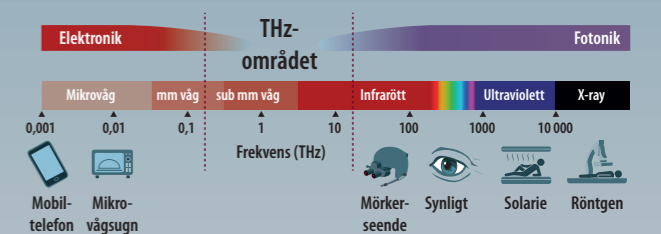
Bandgap
1,35

Det snabbaste halvledarmaterialet, har lägst brus men är också dyrast, används vanligtvis i "exotiska" avancerade applikationer inom rymdsektorn.

InP DHBT (se nedan) används i högeffekts- och högfrekvent elektronik på grund av dess överlägsna elektronhastighet jämfört med de vanligare halvledarna kisel och galliumarsenid.

THz-området

Det finns fortfarande en mycket underutnyttjad, men tekniskt spännande zon i det elektromagnetiska spektrumet mellan mikrovågor och infraröd, ofta kallad terahertz. Elektromagnetiska vågor i detta område har hybridegenskaper, de visar högfrekventa och optiska egenskaper samtidigt. InP-baserade komponenter läser upp detta spektralområde för viktiga nya applikationer. Exempel är bildalstrande skannrar, trådlös kommunikation för extremt höga dataakter och radioastronomi.



Tillämpningar – Kisel

Det mesta inom elektronik utom vissa analoga applikationer och extrem kraftelektronik.

Fördelar

Mogen, mångsidig och billig teknologi

Nackdelar

Få och dominerande producenter vilket ger en känslig värdekedja.

Börjar nå gränsen för sin utvecklingspotential.

Tillämpningar

Mobiltelefoner

Mikrovågssystem som radar

Trådlös kommunikation upp till 1 THz

LED (nära infraröd laserdioder)

Solceller (högeffekt) och detektorer

Transistorer i RF-förstärkare

Fiberoptisk temperaturmätning

Fördelar

Mogen teknologi

Nackdelar

Inte mycket ny forskning

Temperaturkänsligt

Dyrare än kisel

Tillämpningar

Trådlös digital kommunikation i höga dataakter

Radarsensorer för bilar

Fördelar

Kopplar bra till kiselkomponenter

Höga dataakter

Tillämpningar

Extremt snabb trådlös kommunikation

Radioteleskop

Kvantdatorer

Vapensystem

Satelliter

5G och 6G-system

Fördelar

Lågt brus

Höga dataakter

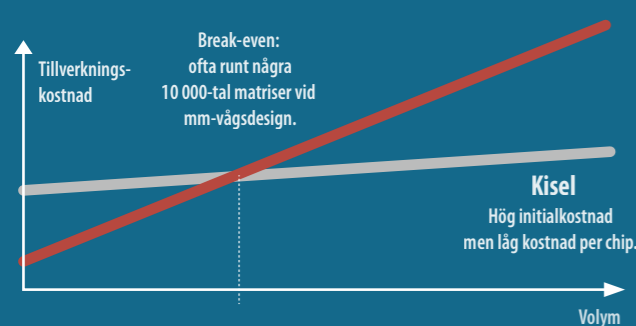
Nackdelar

Svår kylning

Dyrt

Kisel eller GaAs

Diagrammet visar att även om GaAs vid vissa RF-applikationer är billigare initialt så blir det snart omkört av kiselteknologi så snart tillverkningsvolymen ökar.



GaAs

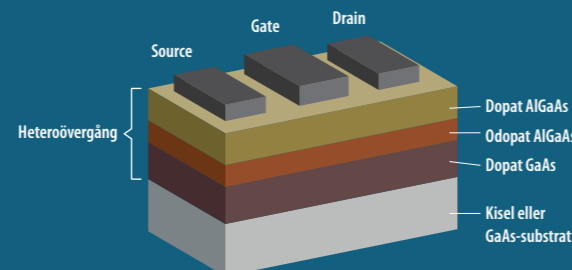
Låg initialkostnad men hög kostnad per chip.

Kisel

Hög initialkostnad men låg kostnad per chip.

HEMT - High-Electron-Mobility Transistor

En HEMT är en fälteffekttransistor som innehåller en övergång mellan två material med olika bandgap (även kallat heteroövergång). Heteroövergången fungerar som kanal för laddningsbärande istället för den dopade region som i allmänhet används i en MOSFET-transistor (se sid 92) och erbjuder högre elektronmobilitet och därmed bättre prestanda. En vanlig materialkombination är GaAs med AlGaAs (Aluminium Gallium Arsenid), även om det finns stor variation beroende på vad enheten ska användas till.

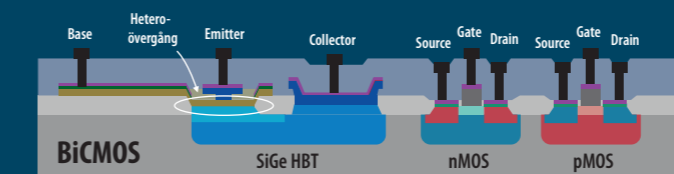


HBT - Heterojunction Bipolar Transistor

En HBT är en typ av bipolar junction transistor – BJT (se sid 90) som använder flera halvledarmaterial vid emitter- och basområdena, vilket skapar en så kallad heteroövergång och därmed ett justerbart bandgap. HBT:n förbättrar BJT:n genom att den kan hantera signaler med mycket höga frekvenser, upp till flera hundra GHz.

BiCMOS - Bipolar CMOS

Bipolar CMOS (BiCMOS) integrerar två halvledarteknologier, BJT (bipolar junction transistor) eller HBT (heterojunction bipolar transistor) tillsammans med CMOS-logikgrindar, i en enda integrerad krets. De har utmärkta egenskaper för högfrekventa analoga förstärkare inklusive radiofrekvensförstärkare med lågt brus.



DHBT Double Heterojunction Bipolar Transistor

En dubbel HBT-transistor (DHBT) har heteroövergångar vid både emitter-bas- och bas-kollektorövergångarna. Heteroövergången vid emitter-bas används även i den enkla HBT:n, men den extra heteroövergången tillåter ett material med högt bandgap i bas-kollektordelen vilket förbättrar genombrottspotentialen genom att öka det maximala fältet som kan uppnås före genombrott.

Indiumfosfids låga brusegenskaper gör att det bland annat används för att fånga upp ytterst svaga signaler från yttre rymden.



Material med breda bandgap

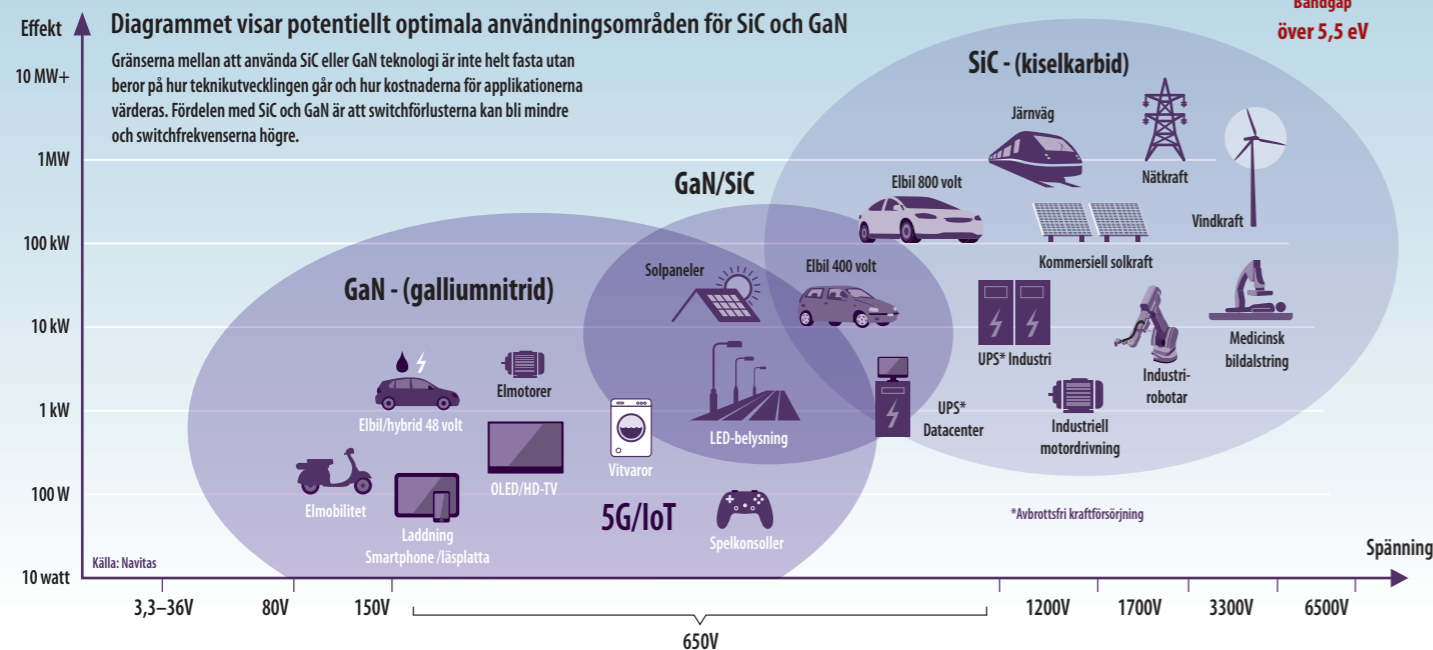
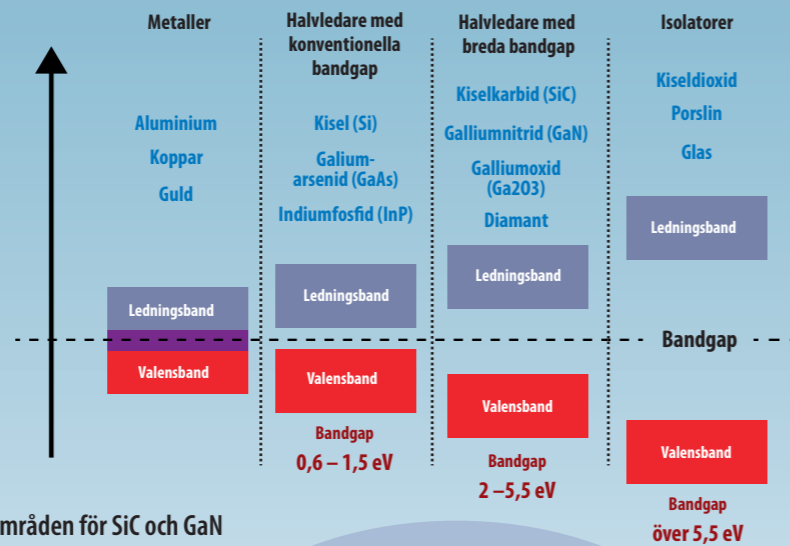
Halvledare med stort bandgap kan användas vid betydligt högre temperaturer och högre elektrisk spänning med bibehållen funktionalitet, jämfört med kisel. Kisel är fortfarande störst när det gäller att bygga olika omvandlare för elektrisk energi, kiseltyristorer kan blockera över 10 000 volt, men utmanarna kiselkarbid och galliumnitrid kommer allt mer.

Framtidens kraftkomponenter

Material med breda bandgap kallas även WBG-material (wide-band gap) och de kan komma att spela en stor roll i den fortsatta globala elektrifieringsprocess som väntar de närmaste decennierna.

Det högre energigapet ger enheterna möjlighet att arbeta vid högre temperaturer, eftersom bandgap typiskt krymper med ökande temperatur. Detta kan vara problematiskt vid användning av konventionella halvledare med smala bandgap – som kisel som då kan tappa i verkningsgrad.

Material med breda bandgap kan ge minskade effektförluster, ge högre effekttäthet, underlätta kompakt omvandlar design, minimera miljöpåverkan och ge lägre totala systemkostnader.



Kiselkarbid - SiC

Bandgap 3,03–3,26

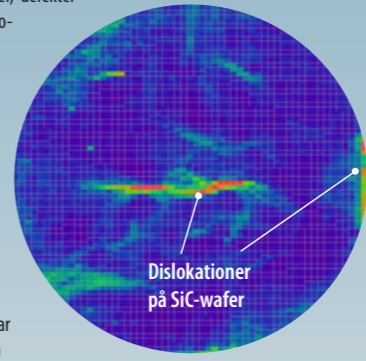
Kiselkarbid är ett mycket hårt material med stort bandgap och har egenskaper som passar för högeffektselektronik. Power-MOSFET: s i kiselkarbid klarar riktigt höga effekter utan att gå sönder.

SiC är en sammansatt halvledare (kisel och kol) och det är tillverkningen av högkvalitativa SiC-wafers som är en av de stora utmaningarna. Då kiselwafers sågas ur man höga kiselpelare som dras upp ur en ren kiselmalta, så tillverkas SiC med hjälp av olika epitaxi och sublimationsmetoder (se sid 94) vilket gör dem endast en tvårhund höga.

Dessutom uppstår lätt så kallade dislokationer, defekter i kristallstrukturen som gör att antalet komponenter som kan tillverkas på skivan minskar.

Många polytyper

Materialkvaliteten för SiC-skivor är idag tillräckligt bra för att tillverka elektroniska komponenter men är fortfarande låg jämfört med Kisel. Att växa defektfritt SiC-material är mycket svårt då SiC har många så kallade kristallina polytyper, det vill säga hur bindningarna mellan atomerna i kristallen kan formera sig. SiC:s bandgap och elektroniska egenskaper varierar också något beroende på vilken polytyp man väljer. Den polytyp som är mest intressant för högeffektselektronik är en hexagonal struktur som kallas 4H.



Tillämpningar

- Kraftelektronik
- EMC-skydd
- Elektromagnetisk verkan
- Sensorer

Fördelar

- Tål mycket höga effekter
- Tål höga temperaturer

Nackdelar

- Fortfarande dyra substrat
- Kan vara svårt att dopa

Galliumnitrid - GaN

Bandgap 3,45

Även GaN är ett material med stort bandgap som passar för högeffektselektronik. Men materialet har också intressanta egenskaper när det gäller optoelektroniska- och högfrekventa applikationer. GaN odlas oftast på främmande substrat som kisel eller safir.

GaN-kraftelektronik

Inom kraftelektroniken används GaN med laterala HEMT:ar se sid 16. Det betyder att tillverkningsprocessen är horisontell för att passa etablerade produktionskedjor. Det är dock inte optimalt då kraftkomponenter oftast har en vertikal konfiguration för optimal genombrottsströmning och verkningsgrad.

GaN-mikrovågsteknik

GaN har under de senaste 20 åren haft en snabb utveckling inom mikrovågsteknik. Eftersom GaN-transistorer kan arbeta vid mycket högre temperaturer och arbeta vid mycket högre spänningar än galliumarsenid (GaAs) transistorer, är de idealiska effektförstärkare vid mikrovågsfrekvenser. I moderna radarsystem används GaN-halvledare i ökande omfattning, främst upp till X-band (runt 10GHz). Även i basstationer >5GHz används GaN-transistorer.

Rymd- och militära applikationer

GaN:s låga känslighet för joniserande strålning gör det till ett lämpligt material för solcellsmatriser för satelliter. Militära- och rymdtillämpningar kan också vara intressant eftersom enheterna uppträder stabilt i miljöer med hög strålning.



GaN används i JAS 39 Gripen

Tillämpningar

- Kraftelektronik
- Radarsystem upp till X-band
- Trådlös kom. basstationer (<5GHz)
- Lysdioder och lasrar

Fördelar

- Tål höga effekter
- Tål höga temperaturer
- Intressant för THz-området

Nackdelar

- Fortfarande dyra substrat

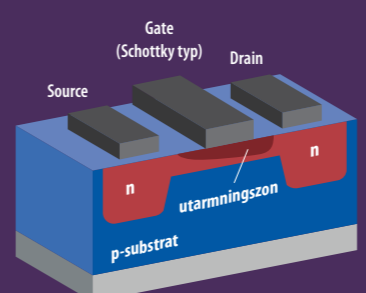
Tre exempel på typer av omvandlingstillämpningar för kraftelektronik



MESFET – Metal-Semiconductor Field Effect Transistor

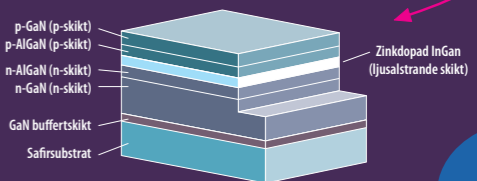
MESFET används gärna med sammansatta halvledarteknologier, såsom galliumarsenid, indiumfosfid eller kiselkarbid. Transistortypen används vid högre frekvenser och effekter istället för MOSFET men till en högre kostnad.

MESFET innebär att gaten är av metall-halvledartyp, så kallad Schottky-typ (se sid 97). Detta innebär att det är en transistor av majoritetsbärartyp. Vilket i sin tur innebär att det är elektroner och inte hål som fungerar som laddningsbärare. Och elektroner har högre mobilitet än hål varför transistorn blir snabbare.

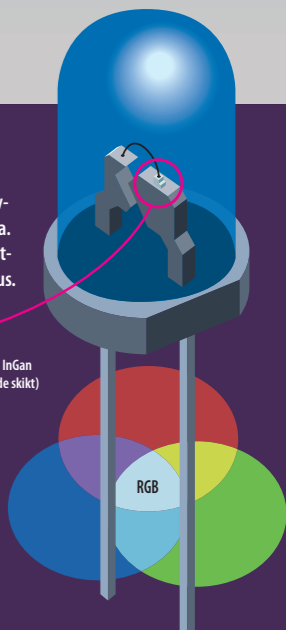


GaN-LED – Light-Emitting Diode

Lysdioder tillverkas i många färger och det är valet av halvledarmaterial som bestämmer vilken färg lysdioden ska ha. Exempelvis kan Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) ge rött och infrarött ljus och Indiumgalliumnitrid (InGaN) grönt ljus.



Men det var först under 1990-talet – med den GaN-baserade ledlampen – man kunde skapa det blåa ljuset som enligt additiv färgblandning, öppnade dörren för de vita LED-lampor vi idag har i våra hem.



Carl-Mikael Zetterling har hållit på med kiselkarbid i 30 år – och har inte tröttnat. De första tio åren utvecklade vi processteknologi för att göra komponenter i kiselkarbid istället för kisel och sedan gjorde vi komponenter för kraftelektronik.

Carl-Mikael Zetterling är professor och avdelningschef för avdelningen elektronik och inbyggda system vid Kungliga tekniska högskolan, KTH i Kista. Forskarkarriären har tagit honom till USA och Japan och han har publicerat cirka 300 vetenskapliga artiklar.

– Jag började på KTH som doktorand för 30 år sedan och har blivit kvar. Jag har bara hört talas om den svenska storhetstiden när det fanns pengar och höga ambitioner. Nu har jag ungefär tio år kvar i arbetslivet och funderar vad man ska forska på. Jag tycker att det är kul med elektronik. Det har varit olika saker som har intresserat mig. Jag har undervisat om halvledare i 20 år, men arbetar nu mer med hur man gör kretskort och system och produktion.

Klarar 600 grader

I grunden är Carl-Mikael Zetterling elektrotekniker och kom in på kiselkarbiden tack vare Mikael Östling (se sid 6).

Kiselkarbid är bra för halvledare inom kraftelektronik. All elektrisk energi omvandlas hela tiden och i alla steg sitter energiomvandlare.

– Dessa vill man göra så effektiva som möjligt. Med bredbandshalvledare kan man få ut den sista procenten. Är det värt det? Med en verkningsgrad på 96 procent slösar man bort fyra procent. Ökar man till 98 procent har man halverat förlusterna och därmed minskar behovet av kylning. I omvandlarna används kiselkarbidhalvledare. Bara en liten del av kiselkarbidskivan behövs för att blockera strömmen jämfört med en kiselkiva. För el-bilar ansågs tolv volt

duga och då behövs ingen kiselkarbid. Men nu är man uppe i 800 volt. Då blir våra så kallade powermosfettransistorer på 1200 volt intressanta (se grafik sid 19).

Integrerade kretsar ska klara brus i form av strålning och höga temperaturer. Vid 200 grader börjar det bli svårt med kisel, men kiselkarbiden klarar minst 600 grader.

Intelligenta borrkronor

En användning för kiselkarbid kunde vara i intelligenta borrkronor. Djupt

som till exempel det havererade kärnkraftverket Fukushima i Japan. Strålningen är så stark att elektroniken dör direkt. Kameramodulen är särskilt känslig.

– Det skulle möjligen vara ett område förutsett att vi får pengar för att ta fram integrerade kretsar.

– Jag såg tidigt möjlighet att göra integrerade kretsar med bättre värmestållighet vilket gjorde att KTH kom med i Venusprojektet. Vi visade att man nog kan bygga en landare under hundra kilo som tål temperaturen på Venus,

»Vi visade att man nog kan bygga en landare under hundra kilo som tål temperaturen på Venus, 500 grader.«

neri i jorden är det varmt och det finns strålning. Man måste borra djupt för att leta efter olja och gas och borren går att styra. I borrkronan sitter mycket elektronik och krånglar den måste man ta upp den som kan vara flera kilometer under jordytan. Det är dyrt och det tar tid. Med kiselkarbid i borrkronans elektronik skulle den risken minska.

– Vi var i kontakt med oljeindustrin, men så dök oljepriset och bolagen lade ned sina tekniska avdelningar för att överleva. Om det inte finns en efterfrågan så tar ingen fram ett chip som klarar 400 grader och ingen gör en kapsel för 400 grader om det inte finns ett chip som behöver det.

Ett annat område skulle vara autonom övervakning i miljöer med hög strålning

500 grader. Ju mer vi vet om atmosfären på Venus desto mer vet vi om jordens atmosfär. Att bygga landaren var en sak. Att skicka den till Venus något annat. Fraktpriset är två miljarder euro. Venusprojektet, Working on Venus, stöddes av Wallenbergstiftelsen. Det varade mellan 2014 och 2019 och forskningen resulterade bland annat i åtta nya doktorer. (<https://www.kth.se/blogs/wov/>)

Om framtiden är det svårt att sja, säger Carl-Mikael Zetterling. Jag har inga bra svar vad man ska forska på. Men kan konstatera att det som idag är självklart som kiselkarbid en gång inte var det. □

**CARL-MIKAEL
TRÖTTNAR ALDRIG
PÅ KISELKARBID**

KISELKARBID VINNARE EFTER 30 ÅRS FORSKNING

William Shockley vid Bells laboratorier var en av pionjärerna i utvecklingen av transistorer. Redan på 1950-talet förutspådde han en stor framtid för kiselkarbid. Ungefär vid denna tid hade professor Yu M Tairov i Leningrad varit först med att framställa syntetisk kiselkarbid. Sedan dröjde det många år innan det tog fart. Forskning tar tid, säger Johan Ekman, chef för företaget Kisab, Kiselkarbid i Stockholm.

Det är hundra gånger svårare att göra kiselkarbid än kisel. Kiselkarbid är hälften kisel och hälften kol. Nya material skapar nya möjligheter. Kiselkarbid är bättre än kisel på att klara höga strömmar och spänningar. Komponenter av kiselkarbid blir inte för varma och kortsluts inte och isolerar bättre än kisel och har därför lägre förluster.

Det finns många olika kristaller med olika fysiska egenskaper. För kraftelektronik väljer man mellan kiselkarbid och galliumnitrid. Kisab har tagit fram nästan defektfria kiselkarbidskivor. De kan användas för produktion av kraftelektronik-komponenter som framöver kommer att spara mängder med energi.

– Det är mycket svårt att göra stora kristaller till låg kostnad och med låg defekttäthet. Det finns massor av tricks för att göra en kristall bättre, säger Johan Ekman. Vår teknologi är frukten av både teoretiska studier och egna erfarenheter från otaliga tillväxtexperiment. Många har bidragit till framgången. Johan Ekman pekar speciellt ut en person, Kiselkarbidens "grand old lady" professor doktor Rositsa Yakimova som växte upp i Bulgarien. Hon har forskat på alla kända metoder för tillväxtsystem för

kiselkarbid. När man utvecklar en ny tillväxtmetod krävs många år av forskning och massor av experiment för att se vad som fungerar. Rositsa Yakimova började arbeta med kiselkarbidtillväxt i slutet av 1960-talet och tillbringade många nätter med tillväxtexperiment i professor Tairovs källare under sina doktorandstudier i Leningrad. Rositsa Yakimova har under många år med goda råd lotsat vår grupp till framgång, säger Johan Ekman. Rositsa Yakimova genomförde under perioden 1994–2006 grundforskningen av tillväxtmetoden sublimationsepitaxi (sublimation är när ett ämne övergår direkt från fast form till gas) som ligger till grund för fast sublimation growth process, FSGP som utvecklats av Kiselkarbid i Stockholm AB. Med den snabba sublimationstekniken kan man växa stora kristaller med mycket låg defekttäthet, fyra gånger snabbare än med traditionell pulver-tillväxtteknik. Enkelt uttryckt handlar det om att man har två skivor som placeras nära varandra, den ena skivan består av poly-kristallin kiselkarbid och den andra av mono-kristallin kiselkarbid. Genom sublimation av material från den poly-kristallina skivan och tillväxt på den mono-kristallina skivan skapas en tjockare mono-kristallin kristall.

De gav världen LED-lampan

Tre japaner, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano och Shuji Nakamura, fick 2014 Nobelpriset i fysik för sin forskning om tillväxt av galliumnitrid på safirsubstrat som i sin tur gav världen LED-lampan. För att få vitt ljus krävs en kombination av alla spektrumets färger i ungefär lika proportioner. Det svåra var att till en låg kostnad tillverka en diod som emitterade energirik blått ljus vilket sedan i en fosfor kan omvandlas till vitt ljus. Johan Ekman arbetade i sju år i Japan i professor Isamu Akasakis grupp för att ersätta fosfor med en dopad kiselkarbidkristall. Resultaten från grundforskningen var en process för tillväxt av basplansdislokationsfria kiselkarbidkristaller.

– Dislokation är en kristalldefekt, en



En sak är att göra kiselkarbidskivor. Konsten är att göra dem nästan felfria. Här ett foto på en kiselkarbidskiva från Kisab.

avvikelse från det välordnade mönstret i det kristallina materialet. I kiselkarbidkristaller är de vanligast förekommande defekterna kant-, skruv och basplansdislokationer. I kristaller som används i kiselkarbidkomponenter strävar man efter att tillverka material med så få dislokationer som möjligt, speciellt basplansdislokationer är besvärliga eftersom de förändrar komponenternas egenskaper, förklarar Johan Ekman och han säger att hans företag är det enda i världen som producerar kristaller som är helt fria från basplansdislokationer.

– Det har varit svårt och tagit lång tid att etablera en repeterbar produktionsprocess men vi börjar nu leverera "samples" till kunder. Ett företag som köpt våra skivor rapporterar att de kunde använda 97,5 procent av skivans yta och ett annat företag uppnådde 99,5 procent. Det finns många olika kristalldefekter som påverkar kiselkarbidkomponenternas prestanda. Vi talar om defekter av värsta sorten, killer defects, och de mer hanterliga non-killer defects. Varje dislokation leder till energiförluster och problemen växer med strömtäthet och spänning.

– I dag gör vi skivor med en diameter på 150 mm och vi förstör nu våra skivor till 200 mm. Det ger nästan dubbelt så många komponenter per skiva och eftersom tillverkningskostnaden är nästan densamma så halveras komponentkostnaden. Skivorna tillverkas i Electrumlabbet i Kista. Vi har kapacitet att göra 40 skivor om dagen. Robotar laddar reaktorer som går dygnet runt. Vi har tillsammans med en ingenjör i Lund konstruerat våra egna reaktorer. Bakom det här ligger spjutspetsforskning som är frukten av 30 års arbete.

– Tack vare Yakimova och sedan det som jag gjort tillsammans med min grupp så har vi skapat ett produktionsystem med vilket vi kan tillverka stora volymer med en defekttäthet som är mindre än våra konkurrenters. Vi kommer med tiden att inte bara ha de bästa skivorna utan också de lägsta tillverkningskostnaderna. Vi har fått 8,5 miljoner kronor av EU för att konstruera en ny CVD-reaktor för högvolymproduktion. Den kommer att installeras i Lund med en kapacitet om 700 skivor, varannan

»En sådan här teknik utvecklas sällan i storföretag utan snarare av små grupper med hängivna personer som har idéer och visioner.«



Johan Ekman, chef för företaget Kiselkarbid i Stockholm, Kisab.

dag. Vi ska också köpa fyra ytterligare produktionsreaktorer som kommer att installeras i Kista med en tillverkningskapacitet på 120 skivor om dagen.

– En sådan här teknik utvecklas sällan i storföretag utan snarare av små grupper med hängivna personer som har idéer och visioner, säger Johan Ekman.

– Det är bättre för storföretagen att köpa den färdiga tekniken från de små företagen. Man kanske får betala lite mer, men det blir ändå billigare än att försöka bygga upp något innovativt själv.

Det är en internationell atmosfär i Johans företag. Företaget har elva anställda varav fyra utan invandringsbakgrund. Övriga kommer bland annat från länder som Iran, Syrien och Pakistan. Tidigare anställda har kommit från Libanon, Kina, Spanien och Palestina. De flesta är civilingenjörer eller doktorer från KTH.

– Vår affär är inte att tillverka och sälja skivor. Vi utvecklar processer för att tillverka skivor i stora volymer men när utvecklingsfasen är avslutad är det kanske bäst att en av de stora komponenttillverkarna tar över och ökar produktionen till riktigt stora volymer.

– Nu när samhället ska elektrifieras vill

många stora firmor investera i vårt företag men i början var det svårt att locka investerare. Johan Ekman understryker att vi i Sverige måste investera mer i teknisk utveckling och produktion och visa att vi kan göra saker själva annars sänks på sikt levnadsstandarden. Tyskland är i detta avseende en förebild med teknikoriering i sina investeringar och man har inte slutat att tillverka. Många länder i Asien har statliga investeringsstrategier, man trycker pengar och stoppar in dem i den forskning som är på modet. I Sverige har vi på många områden utvecklat ny teknik som används i hela världen. Här finns på många områden världens bästa kunskaper och bakom det står individer som till exempel professorerna Rositsa Yakimova, Hans Östling, Carl-Mikael Zetterling och många fler. Om samhället kraftfullare stödjer våra ledande forskare och uppfinnare och investerare stödjer kommersialiseringen av deras uppfinningar så går Sverige en ljus framtid till mötes och nya företag kommer att skapa välstånd för kommande generationer. □

Detta tillverkas på wafern

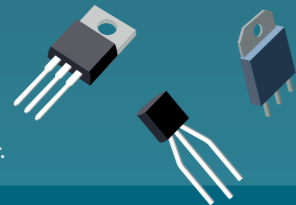
På en kiselwafer kan många skilda typer av halvledarkomponenter tillverkas. Allt från enstaka (diskreta) komponenter till mycket komplexa integrerade kretsar med flera miljarder sammankopplade transistorer.

Diskreta komponenter

En diskret komponent är en enskilt kapslad elektronisk komponent. Komponenten kopplas ihop med andra komponenter för att få önskad funktion.

Exempel på diskreta komponenter är transistorer, dioder, resistorer, kondensatorer och tyristorer.

Motsatsen till diskreta komponenter är integrerade kretsar.

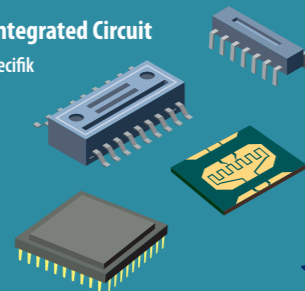


Integrerade kretsar (IC)

En integrerad krets (IC eller chip) är en elektronisk krets där flera komponenter tillverkas och kopplas ihop tillsammans på samma kiselsubstrat. Antalet komponenter på en integrerad krets kan variera mellan minst två till flera miljarder.

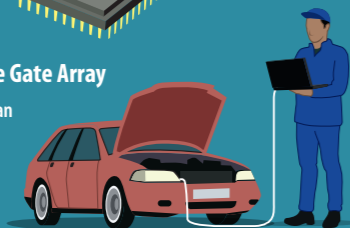
ASIC – Application Specific Integrated Circuit

Är en integrerad krets (IC) som har en specifik funktion snarare än en allmän uppgift. En integrerad krets som är designad för att styra en el-tandborste eller kassaapparat är exempel på enkla ASIC. Komplexa ASIC kan bestå av flera processorer och funktionsblock ihopkopplade till ett system kallat SoC (se nedan).



FPGA – Field-programmable Gate Array

Påminner om en ASIC men funktionen kan ändras genom att ny programmering översänds genom anslutning av en kabel, exempelvis motorstyr-systemet i en personbil.



Komponenter på datorns moderkort

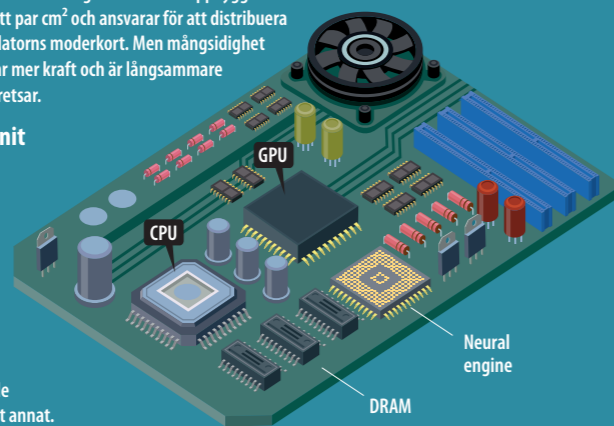
CPU – Central Processing Unit

En CPU är huvudkretsen i en dator, telefon eller tv. Dagens CPU:er är uppbyggda av miljardtals transistorer på en kiselkrydda av ett par cm² och ansvarar för att distribuera instruktioner till övriga komponenter på datorns moderkort. Men mångsidighet kommer med en kostnad, en CPU förbrukar mer kraft och är långsammare i vissa funktioner än mer specialiserade kretsar.

GPU – Graphical Processing Unit

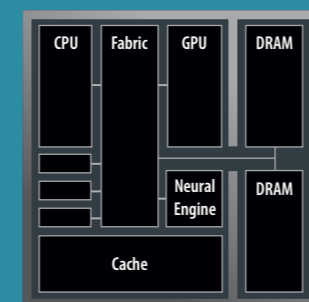
Grafikprocessorn är optimerad för grafikrelaterade beräkningar för bildskärmen. Den har många kärnor vilket gör att den kan utföra flera beräkningar parallellt vilket också gör GPU:n användbar vid kryptering och djupinlärning.

Det finns många andra halvledarkretsar i en dator som exempelvis olika typer av arbets- och lagringsminnen, specialiserade kretsar för ansiktsgenkänning och mycket annat.



SoC – System On a Chip

En integrerad krets som innehåller flera funktionsblock som CPU, GPU, arbetsminne med mera – tillverkade och integrerade på ett och samma chip. Fördelarna är snabbare dataöverföring och mindre värmeutveckling.



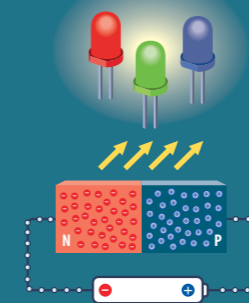
Apples nya M1 MAX-chip är ett SoC uppbyggt av 57 miljarder transistorer.

LED-komponenter och solceller

Både LED-lampan och solcellen är dioder tillverkade av dopade halvledarmaterial för att skapa de pn-övergångar där positiva- respektive negativa laddningsbärare kan interagera med varandra. Men där solcellen omvandlar ljus till elektrisk ström så gäller det omvända för LED-lampan.

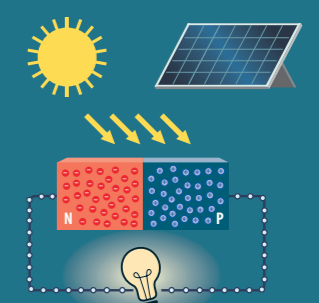
pn-övergång – LED

Elektronströmmen från en spänningskälla ger upphov till ljus när elektronerna "faller ner" i hål. För kisel handlar ljuset om värmestrålning – lysdioderna är i stället gjorda av galliumarsenid, galliumnitrid eller andra halvledarmaterial för att ge synligt ljus.



pn-övergång – solcell

Den uppladdade kapacitansen i pn-övergången (= spänningskälla) driver en ström i kretsen. Elektronströmmen kommer av de extra ledningselektroner som ljuset skapar.



Mer om lysdioder och solceller på sidan 72–73.

Kraftelektronik

Kraftelektronik är tillämpningen av elektronik för att styra och omvandla elektrisk kraft. Det sker med speciella halvledarkomponenter som dioder, tyristorer och effektt transistorer såsom effekt-MOSFET och IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor).

Kisel är fortfarande störst inom kraftelektronik. Men för att uppnå bättre verkningsgrad och tillförlitlighet börjar material som SiC (kiselkarbid) och GaN (galliumnitrid) med stora bandgap bli allt vanligare.



Användningsområden

- El- och hybridfordon (bil, tåg)
- Krafttaggregat & transformatorer
- Trådlös laddning
- Avbrottsfri kraft (UPS)
- Motorstyrning i industrin
- Strömförsörjning i tele- och datakom
- Omriktare i solpaneler och vindkraftsverk



Radio och sensorer

Snabb dataöverföring är en förutsättning för att få morgondagens vision om IoT (internet of things) och autonoma fordon att fungera. Halvledarkomponenter – ofta i mer exotiska halvledarmaterial än kisel – används i högfrekventa tillämpningar, såsom oscillatorer för radio- och radarutrustning.



Inte minst inom rymd- och försvarsapplikationer är höga datataster och robusta sensorer viktiga.

ETT SAMHÄLLE MED HÖGRE SPÄNNING

Hur ska Sverige industrialisera halvledartekniken? Vem ska samordna den satsningen? Det frågar sig Björn Samel vid det statliga forskningsinstitutet Rise, research institutes of Sweden. I dag finns en stor oro kring den export av högteknologi som går från USA och EU till Kina, men pendeln är på väg att svänga tillbaka mot att både forska och utveckla elektronik i Europa, säger Björn Samel.

Björn Samel är chef för den avdelningen inom Rise som arbetar inom halvledarforskning och driver flera olika laboratorier där det senaste är ProNano i Lund som är en forskningsanläggning där svenska företag kan arbeta i renrummiljö med nanoforskning kring halvledare, material och processer. Laboratoriet är en del i den nanomaterialforskning som växer fram i Öresundsregionen.

Björn Samel har en bakgrund inom teknik för mikroelektriska system och halvledarforskning. Hans avdelning, smart hårdvara, forskar inom sensorer, sensormaterial och elektronik. Ett stort forskningsområde är kraftelektronik där Sverige ligger väl framme med forskning vid bland andra Kungliga tekniska högskolan i Stockholm, KTH och ProNano i Lund.

Området handlar om nya material och ny design och byggsätt som leder till större tålighet för höga spänningar, vilket är gemensamt för den elektrifiering som sker. Eldrivna bilar, båtar och flygfarkoster kommer att ställa helt nya krav på elektronikens tålighet för högre spänningar.

– Rise spelar en stor roll för hur forskning om kraftelektronik ska utvecklas i Sverige, säger Björn Samel. ▸



Foto: Björn Norberg

Men vem ska göra det? Ungdomen har inget större intresse för teknik. Riskerar forskningen att försvinna ur Sverige?

– Det är ett problem men också en möjlighet för Sverige, säger Björn Samel. Nyrekryteringen inom elektronik och hårdvara, samt den kompetensutveckling som krävs är absolut ett problem. Området har utarmats under 2000-talet, men samtidigt har vi en ny våg av svenska högteknologiföretag som arbetar med nya material, metoder och ligger i framkant. Vi behöver bli bättre på att skapa förutsättningar för svenska bolag att stanna i Sverige och lokalisera både utveckling och tillverkning här.

En del av den svenska självbilden är våra innovatörer som Alfred Nobel, John Ericsson och vår tids Håkan Lantz och Björn Samel menar att vi fortfarande är ett land av innovativa ingenjörer, men att vi har en del att lära av USA när det gäller kommersialisering.

– Det är relativt lätt att starta företag i Sverige, men riskviljan som krävs för investeringstunga områden såsom elektronik är begränsad. Men det verkar vara en ändring på gång. USA och Europa har startat stora initiativ, Chip Acts, för att säkra kompetens och tillgång till halvledarkomponenter.

Asien började tidigt

I dag är cirka 40 procent av värdet inom halvledarområdet design, där Europa bara har en liten del. Kapslingen, produktutveckling och produktion ligger oftast i Asien. Sverige var tidigare, bland annat tack vare Ericsson och Sony Ericsson, starka även inom kapslingsområdet (se grafik sid 94)

Varför är Asien så dominerande?

– Flera asiatiska länder tog långsiktiga strategiska beslut. Exempelvis insåg Japan redan efter andra världskriget att det här området skulle vara en grundbult i det framtida samhället.

Asiens dominerande ställning bygger på investeringar som gjordes redan på 1950-talet och stora amerikanska företag lade ut tillverkning i Asien för att det var billigt. Inte minst i Kina planeras det på lång sikt, där staten satsar strategiskt på att massutbilda ingenjörer.

– Det är kulturella skillnader som ger en långsiktig syn på en grundläggande teknisk kompetens. Europa har en fri marknad och har även ett mer decentraliserat beslutsfattande. Nu verkar det bli en ändring i Europa, men processen tar lång tid. Europa har dock en stor fördel jämfört med Kina i den mer innovativa kulturen, och vi har

ännu en chans att ta tillbaka kunskap och skapa arbetstillfällen i Europa, säger Björn Samel.

– Politikerna har insett att en satsning på halvledare är en strategisk resurs både för Sverige och Europa och forskning och innovation är områden där Sverige är framstående. Vi behöver ha kompetens i Sverige – kanske inte inom tillverkning, men när det gäller design, byggsätt och materialforskning.

– Det ingår i det säkerhetspolitiska spelet att ha tillverkning i Europa. Man visar att man har muskler. Taiwan bygger en fabrik i Europa för att sprida riskerna och även Intel är på gång med stora nya installationer i Tyskland. □



Foto: Björn Norberg

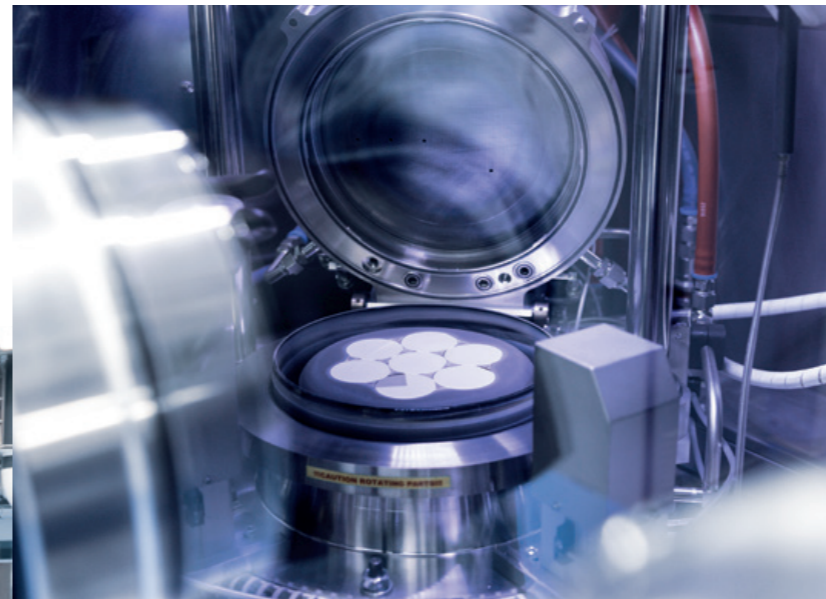
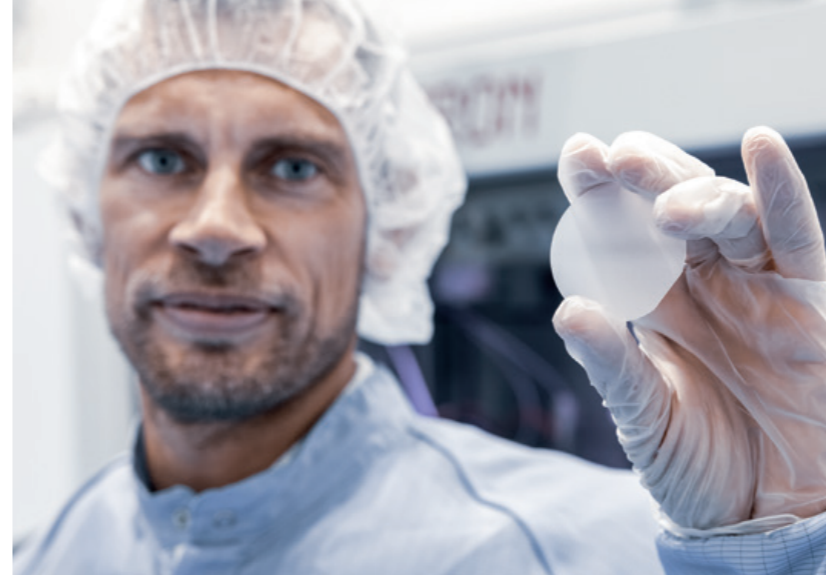
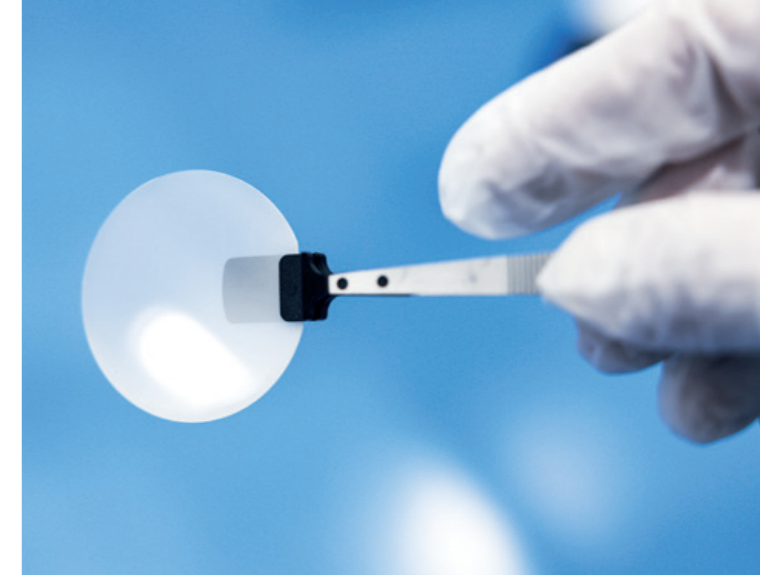


Foto denna sida: David Lagerlöf



»Det ingår i det säkerhetspolitiska spelet att ha tillverkning i Europa. Man visar att man har muskler. Taiwan bygger en fabrik i Europa för att sprida riskerna och även Intel är på gång med stora nya installationer i Tyskland.«

I Lund byggs nu en ny stor stadsdel, Brunnshög med forskning, företag och bostäder. När alla byggnader är klara omkring 2050 ska 40 000 människor bo och arbeta här. I dag är man bara i början. Det bor cirka 1200 människor här – från 44

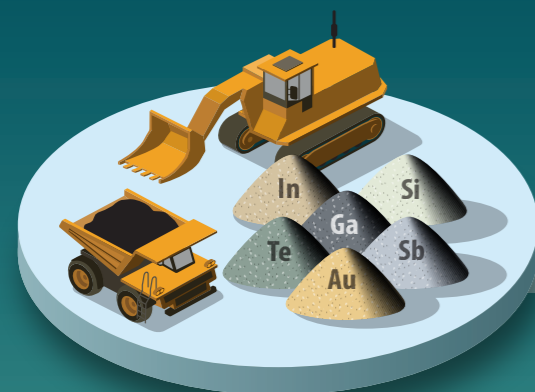
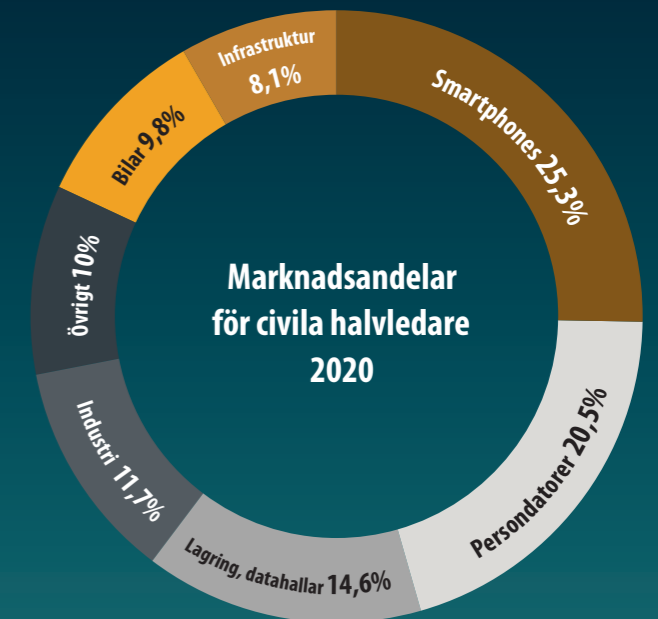
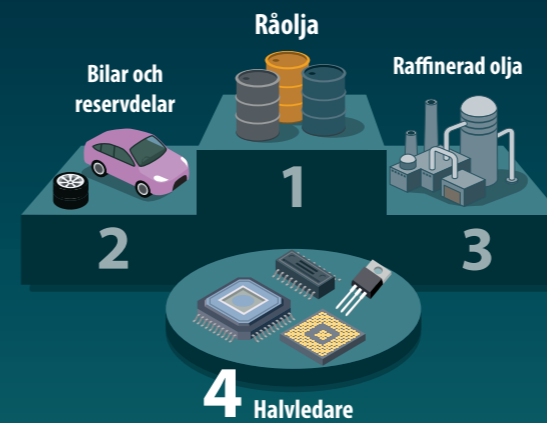
olika nationer. En del av satsningen handlar om nanoforskning med MAX IV, European spallation source, ESS och NanoLab Science som grundpelare. Mindre företag har svårt att finansiera halvledarforskning och tillverkning. Därför investerar Rise i

labmiljöer för att stötta svenska företag. Laboratorierna ger mindre företag en chans att växa och större företag slipper att skaffa egen utrustning. ProNano är ett av de cirka 140 olika test- och demonstrationsmiljöer som drivs av Rise.

Halvledarnas värdekedja

Halvledare är världens fjärde mest omsatta produkt med ett totalt värde på 4 biljoner svenska kronor (4 000 000 000 000 SEK) över hela värdekedjan år 2020. Produktionen är mycket specialiserad och produktionsstegen ofta uppdelade över vitt skilda regioner globalt. Det gör den mycket känslig. Störningar i ett led kan få hela produktionsapparaten att gå i baklås.

Världens fjärde mest omsatta produkt



1. Råvaror

Kisel är det näst vanligaste grundämnet i jordskorpan efter syre. Men modern elektronik behöver idag ämnen från stora delar av periodiska systemet varav vissa utvinns i politiskt känsliga områden.



2. Wafertillverkning

Kiselwafers skapas genom att en kiselpelare – så kallad göt – dras ur en kiselmälta. Japan är en stor producent av kiselsubstrat tillsammans med USA. Vissa andra halvledarmaterial använder olika tillväxttekniker för sina substrat som exempelvis "Fast Sublimation Growth Process" för kiselkarbid eller så kallad *epitaxi* för indiumfosfid.



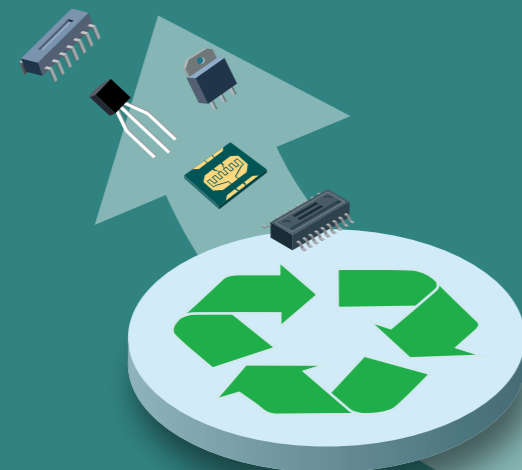
3. Design & arkitektur

Ett datorchip i en modern persondator kan ha över 50 miljarder transistorer och är extremt komplext i sin arkitektur. Reglerna för vad som kan och inte kan tillverkas är mycket reglerade. Speciella designmjukvaror utvecklas framförallt av amerikanska företag.



4. Tillverkning av komponenter

Tillverkningen sker i mycket specialiserade fabriker. De mest avancerade litografmaskinerna kan kosta 150 miljoner dollar och tillverkas bara av ett enda företag i Nederländerna. En hel fullt utrustad produktionsanläggning kan kosta hundratals miljarder dollar att bygga. De mest avancerade fabrikerna ligger i länder i Sydostasien som Taiwan och Singapore. Tillverkning av halvledarkomponenter förklaras mer utförligt på sidorna 94–95.



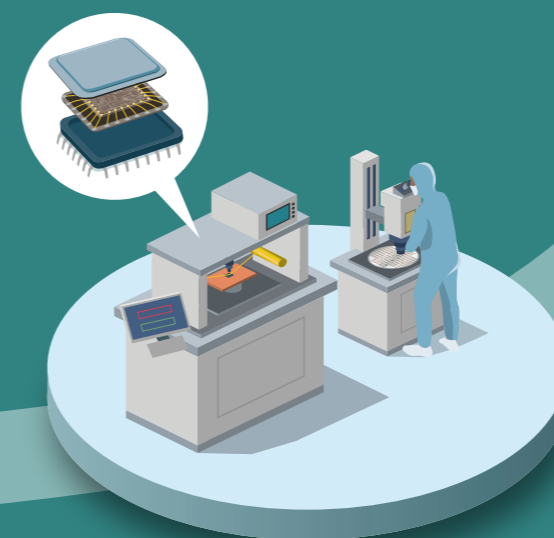
7. Återvinning

Guld, germanium och många andra värdefulla grundämnen tas tillvara för att återföras till värdekedjans kretslopp.



6. Produkttillverkning

En vanlig modern bil kan innehålla upp mot 1 500 halvledarchip och det är framförallt när halvledarkomponenterna sätts i alla otaliga konsumtionsvaror – allt från eldandborstar till mobiltelefoner – som den stora värdeökningen i värdekedjan äger rum.



5. Kapsling

Det finns flera sätt att kapsla de enskilda halvledarchippen när de sågats loss från wafern. Ett är att med en speciell maskin (wire bonding) via guldtrådar förena chipets kontaktytor med kapselns kontaktytor vilka sedan kan lödas fast på ett moderkort. Kapseln fylls också med epoxi eller motsvarande för att skydda mot stötar. Malaysia är stor på den viktiga kapslingen.

Omsättning globalt hela värdekedjan



Källa: ASE Group, UNCTAD, Gartner

MIT-FORSKARE OM FRAMTIDENS ELEKTRONIK

I början av 2022 genomförde försvarsmyndigheterna en seminariereserie med Massachusetts Institute of Technology på temat framtida halvledartekniker, vilket var ett steg i arbetet med denna tekniska prognos.

FMV ansvarar sedan mer än tio år för ett avtal med MIT ILP (Industrial Liaison Program) som ger försvarsmyndigheterna tillgång till världsledande forskare. Vid fem olika tillfällen presenterade fem olika MIT-forskare sina forskningsområden som relaterar till halvledarteknik

Professor Eugene Fitzgerald vid Department of Materials Science and Engineering höll en översiktlig presentation över den kiselbaserade halvledarutvecklingen. Kiselindustrin kommer att dominera under överskådlig tid och utvecklingen av nya halvledare kommer att vara fortsatt beroende av den produktionsinfrastruktur som kiselindustrin byggt upp under 30 år, argumenterar professor Fitzgerald.

Professor Song Han vid Department of Electrical Engineering berättade om tekniker inom AI. En framträdande utvecklingstrend är att utveckla effektivare och mer optimerade AI-algoritmer som ska kunna exekveras i strömsnålare processorer. Det är och har varit ett problem att de komplexare AI-algoritmerna är oerhört omfattande, oöverskådliga och energineffektiva. Genom att skapa mer specialiserade AI-algoritmer och specialiserad

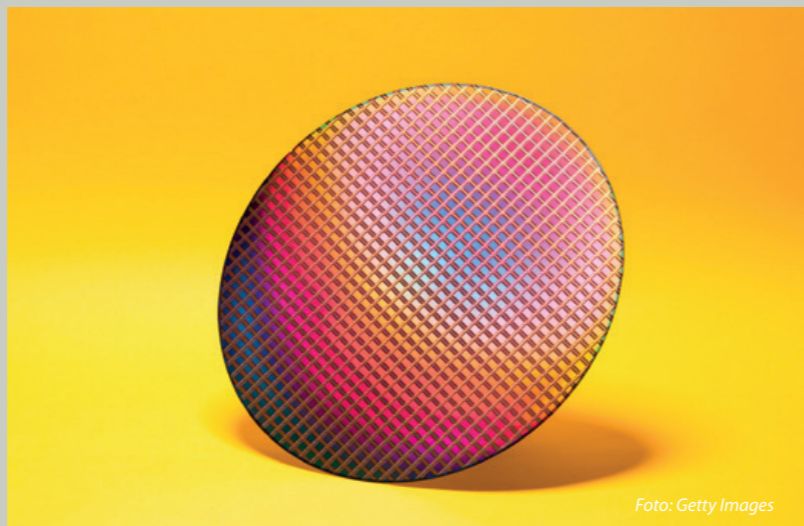


Foto: Getty Images

hårdvara kan energiåtgången minskas och AI-logiken flyttas ut i IoT-landskapet.

Professor Jeehwan Kim vid Department of Mechanical Engineering forskar på hur man kan skapa supertunna och böjbara chip i 2D-material samt neuro-morfisk databehandling. Ett område som kommer att möjliggöra att vi har chip och sensorer i och på våra kroppar.

Professor Mengjia Yan vid Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory forskar på hårdvarusäkerhet. Genom att studera minneshantering och processorns mikroarkitektur

utvecklar hon och hennes forskargrupp försvarsmekanismer mot sårbarheter i de hårdvarunära lagren.

Dr Donnie Keathley vid MIT Research Laboratory of Electronics forskar på vakuumelektronik i nanostorlek. En teknik som kan komma att ge oss nya multi-spektrala sensorer och trådlös kommunikation i PHz-hastighet.

Mikael Schönström, fil.dr. FMV

FÖRSVARET MÅSTE FÖLJA DEN CIVILA UTVECKLINGEN

Professor Eugene Fitzgerald menar att den tid då försvaret kunde utveckla nya tekniker delvis är borta. Förr bekostade den militära forskningen nya tekniker och de första produkterna för en tillämpning som sedan kunde vidareutvecklas av kommersiella aktörer. Nu gäller det att bevaka den civila utvecklingen för att anpassa den till militära krav snabbare än någon annan. Fitzgerald påstår att man i USA ser att Darpa inte riktigt klarar av att skapa nya tekniska inriktningar utan det är den civila utvecklingen som driver på. Den militära sektorn kännetecknas av alldeles för små volymer för att kunna göra någon skillnad.

– Kisel är fortfarande den drivande kraften i halvledarindustrin. Men det betyder inte att några mindre komponenter här och där görs i andra material. Kisel är så dominerande att

det övertrumfar allt och det är där ny teknik kommer att introduceras för kommersiella produkter och det är dit investeringarna går. Den civila tekniken kan sedan anpassas för andra syften, säger Fitzgerald.

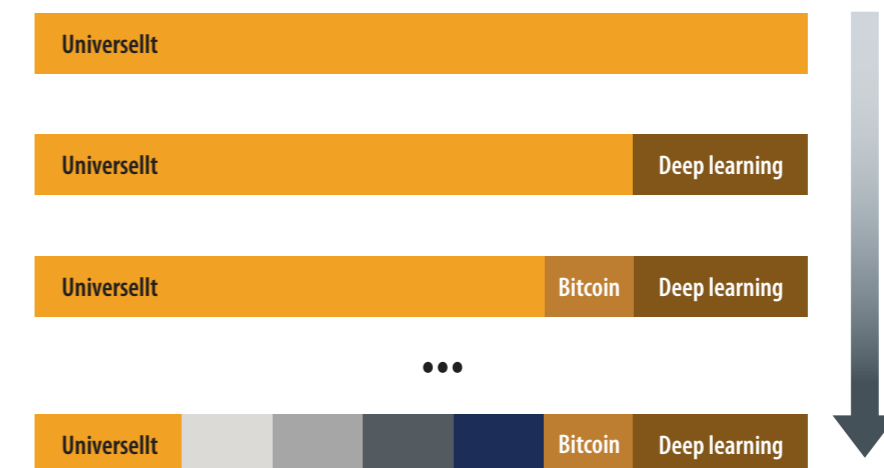
Singapore-MIT Alliance for Research and Technology, SMART är MIT:s forskningsinitiativ i Singapore som Fitzgerald driver. Det är ett tioårigt program. Det startade med en explorativ ansats med olika initiativ och finansierare med det långsiktiga målet att skapa ny tek-

nik som kan kommersialiseras genom nya företag.

När man inte kunde göra processorer snabbare fick man använda fler och istället koppla ihop dem på ett smart sätt för att uppnå systemmålen. Det har gjort att efterfrågan ökat markant på chip och processorer. Tidigare utvecklade man en processor i en ny version. Nu blir det väldigt mycket mer av samma istället och fokus ligger på smart integration. Fitzgerald förklarar att branschen >

»Kisel är så dominerande att det övertrumfar allt och det är där ny teknik kommer att introduceras för kommersiella produkter och det är dit investeringarna går.«

Datorkraften fragmenterar



Ökad specialisering, ökade kostnader för prestanda, skräddarsydda lösningar

Källa: Neil Thompson, CSAIL, MIT

förbättrat kiselteknologin successivt, till exempel genom så kallad strained silicon, och tätare integration av kretsar på chipet. När kapaciteten i teknologin ökade så skapade det i sin tur nya marknader.

Nya uppgifter för kisel

Det finns användningsområden där kisel ännu inte används men där kiselteknologin kan erbjuda ny funktionalitet till en lägre kostnad.

– Halvledarindustrin går in i en ny fas som kommer att vara olik de senaste 40 åren. Tidigare skapades olika marknadssegment utifrån ASICs som var designade för en specifik funktion. Men volymerna växte och det blev lönsamt att skapa generella integrerade kretsar, till exempel CPU. Idag har pendeln vänt och vi designar igen mer specifika kretsar för specifika ändamål, menar Fitzgerald.

– Den generella dataindustrin fragmenteras och för att öka prestandan börjar man utveckla särskilda processorarkitekturer för olika typer av problem och algoritmer. Denna typ av

vertikal integration är kostsam eftersom företagen måste ha personal som behärskar varje nivå i arkitekturen.

– Vilka typer av chip med hög prestanda men till låg kostnad kan vi bygga i framtiden för kommersiella system som i sin tur kan skapa helt nya marknader inom vissa marknadssegment? Du måste kunna jobba inom leveranskedjan som kiselindustrin byggt upp. Det går inte bara att forska fram nya häftiga chip utan man måste också tänka på hur de ska kunna kommersialiseras, menar Fitzgerald.

Han drar paralleller till Iphone 3 som kom runt 2010. Den innehåller två stora centrala chip men också många andra mindre chip som till exempel styr kraftförsörjning, skärmen och trådlös kommunikation. Det fanns mycket att göra för att förbättra integrationen mellan alla dessa chip.

Försvaret liten marknad

För att driva teknikutvecklingen kostnadseffektivt måste kiselindustrins infrastruktur användas för att få volymer till en rimlig kostnad. Det är

en något annorlunda innovationsrymd jämfört med kiselindustrins början då det fanns större svängutrymme för nya saker. Men om även branschen och kiseltekniken är mogen så går det att göra innovation genom vertikal integration, genom att använda lite nya material på olika ställen i kretsarna och ändra arkitekturen.

– Då kan vi göra nya saker med de nya typerna av integrerade kretsar även om de vilar på en gammal infrastruktur. Områden där kiselteknologin kan förbättras är inom kraftelektronik, snabb kommunikation, displayer och fotonik, säger Fitzgerald.

Inom SMART har tekniker utvecklats där III-V komponenter kan integreras på en kiselwafer. Målet är att chipet i sin helhet ska uppnå maximal prestanda. Vissa saker inom till exempel optik går inte ens att göra med kisel, då lägger man till III-V komponenter till kiselwafern, där man vill ha dem. Kiselwafern går igenom den vanliga processen i en kisel-foundry men bara delar av den. Vissa steg har bytts ut där III-V-komponenterna tillförs, men allt kan ske i stor skala i samma foundry, vilket ger nya möjligheter.

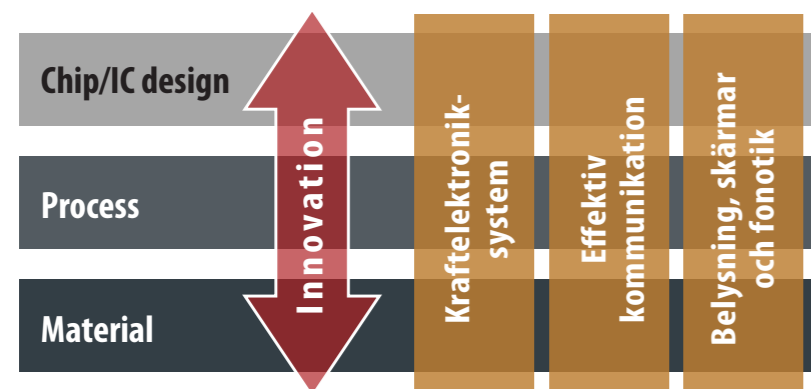
Den första wafern som använde de nya produktionsteknikerna kom 2019, och det var på en 200 mm CMOS-skiva från SMART. Fitzgeralds grupp har i huvudsak tittat på områden som AR/VR, och applikationer för 5G och 6G för den här typen av tillverkningsteknik.

Hur kan dessa trender påverka försvarsindustrin? Om företagen utvecklar egna chip som är så specialiserade för deras produkter? Det kan bli svårt för försvarsindustrin att hitta generella chip att integrera i sina system.

Problemet för försvarssektorn är att det är så små volymer så att den blir begränsad till kommersiella lösningar och det är svårt att anpassa de civila lösningarna till militära ändamål, hävdar Fitzgerald.

Försvarssektorn liknar bilindustrin vad gäller långa produktlivscykler. En komponent kanske ska leva i ett system i tio år. Fitzgerald menar att försvarsindustrin kan studera hur bilindustrin hanterar problemet.

Behovet av vertikal innovation



FRAMTIDENS NEURALA NÄTVERK

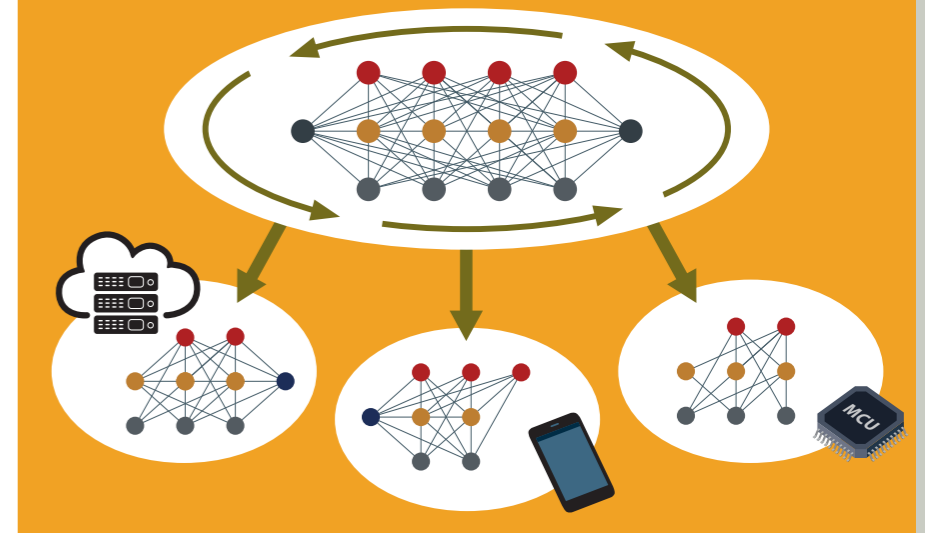
Hur kan ett neuralt nätverk exekveras effektivt på en liten enhet som har begränsad energibudget och saknar snabb uppkoppling? Professor Song Han vid MIT forskar på effektivare neurala nätverk och hårdvara för AI-tillämpningar. Hans forskning går bland annat ut på att med automatiserade verktyg och nya typer av design minska mängden resurser i form av datamängder och ingenjörer som krävs för att träna AI-modellerna. Stora mängder data måste idag processas i molnet för att sedan skickas tillbaka till den mindre enheten. I molnet processas datat i komplexa AI-modeller på servrar som har många GPU:er, graphics processing unit. Det är energikrävande och data måste skickas fram och tillbaka vilket skapar fördröjningar. Små enheter kräver mindre och effektivare AI-modeller eftersom de inte har den processorkraft och bredbandsuppkoppling som krävs för att exekvera de traditionella neurala nätverken. Det finns också ett intresse att få ned energiförbrukningen inom AI ur ett klimatperspektiv. Professor Song Han berättar att ett komplext AI-nätverk under sin träningsfas släpper ut lika mycket koldioxid som fem bilar under sin livstid. Tiny machine learning, TinyML kan användas för att komprimera de stora nätverken så att de kan användas på mindre enheter.

Onödiga neuroner rensas

TinyML är ett område inom maskininlärning och inbyggda system som studerar hur man kan designa maskininlärningsmodeller på små, lågeffektsenheter som en mikrokontroller. En vanlig CPU i en dator förbrukar mellan 65 watt och 85 watt och en GPU förbrukar någonstans mellan 200 watt till 500 watt. En typisk mikrokontroller förbrukar ström i storleksordningen milliwatt eller mikrowatt.

En strategi är att komprimera existerande modeller genom så kallad deep compression. Genom att rensa bort onödiga neuroner och kopplingar så kan man spara en hel del onödiga beräkningar och

TML - Tiny Machine Learning



därmed energi. När modellerna rensas från onödiga neuroner och viktningen görs effektivare kan en AI-modell gå från 100 MB i storlek till 6 MB. 2016 kunde man göra detta. Sista åren har intresset för området ökat exponentiellt enligt professor Han. Idag försöker man utveckla AI-modeller som är effektivare redan från början istället för att komprimera existerande neurala nätverk.

Hur kan vi utveckla nya modeller som är effektivare redan från början, och inte bara komprimera existerande modeller? Neural architecture search, NAS, skapar en designloop där en modell tränas och utvärderas mot ett antal kriterier som till exempel fördröjning och precision. Om modellen inte möter kriterierna tränas modellen igen. Detta ska enligt Song Han gå mycket snabbare än tidigare metoder där programmerare försöker trimma modellen för hand. Tekniken jämförs med electronic design automation, EDA som används för att designa chip. Men Song Han säger att denna teknik inte är särskilt billig och det kan ta

upp till en hel dag att träna ett nätverk och designloopen kanske måste göras om upp till tusen gånger. Och ska nätverket tränas för olika plattformar så måste träningen repeteras många gånger.

Supernätverk tränas

Song Hans strategi är att istället träna ett supernätverk, once-for-all network. Detta delas upp i mindre enheter som i sin tur anpassas för olika mindre hårdvaruplattformar. Vinsten med detta är att det stora nätverket tränas en gång på en stor plattform och man behöver inte träna om varje delnät för de olika mindre hårdvaruplattformarna. Det är dyrt att skapa särskilda AI-nätverk för olika ändamål och plattformar. Song Han menar att det är möjligt att i realtid anpassa neurala nätverk till plattformar som kanske har lägre energibudget och vice versa. Det blir även enklare att hantera versioner då det är bara ett stort nätverk som måste underhållas. Song Han hävdar att flera delnät kan genereras mer ▸

eller mindre gratis, då alla nätverken delar vikterna. Detta efterliknar den mänskliga hjärnans sätt att arbeta då den arbetar energismart, och aktiverar bara de delar som måste aktiveras.

Man behöver inte träna hela modellen utan bara köra inferensen. Eftersom man kan dela upp det stora nätverket i mindre delar som sedan exekveras i mindre enheter kan man nu uppnå låg fördröjning och hög noggrannhet.

Prototyper i små nätverk

Tekniken möjliggör semantic segmentation vilket innebär att varje pixel i en bild kopplas ihop med det objekt den tillhör, till exempel en bil. Även ansikten och människors position kan analyseras i realtid. Det här är mycket användbart i applikationer för autonoma fordon. AI-verktyget kan snabbt skilja personer från bilar och vägar.

– Man kan accelerera exekveringen av generativa modeller vilka är väldigt processorkrävande och långsamma att exekvera. Det stora nätverket tränas en gång, därefter väljs olika subnät ut, vilka kostar lite och är snabba för att göra prototyper. De små delnäten används i prototypfasen och när man hittat en lämplig lösning körs det stora nätverket som ger den slutliga högkvalitativa versionen, förklarar Han.

Han har studerat hur man kan förbättra designprocessen kring AI. Han föreslår så kallad co-design, där det neurala nätverket och hårdvaran designas samtidigt. De kallar det för neuro accelerator architecture search, NAAS. Genom att kombinera hårdvarudesignen med designen av det neurala nätverket så får man gemensam återkoppling från de båda designspåren som har lite olika parametrar att uppfylla. Denna design som utförs av algoritmer är en mycket effektivare metod än traditionell design som görs av människor. Modellen har anammats brett av branschen. Song Han nämner till exempel Alibaba och Amazon.

Professor Han strävar efter att göra AI-modellerna mindre. Man vill kunna köra AI-algoritmer på IoT-enheter och mikrokontroller. Det är väldigt svårt

att designa neurala nätverk för små plattformar. Det är annorlunda jämfört med till exempel mobiltelefoner. Det saknas dynamic random access memory (DRAM), operativsystem, och virtuellt minne. Små enheter lider av extrema minnesbegränsningar. En mikrokontroller har kanske bara 256 kB RAM jämfört med en GPU i mobilen som kan ha flera GB minne.

Gränserna pressas

Microcontroller units net, MCUNet är ett neuralt nätverk som Song Hans grupp utvecklat, och de har testat detta nätverk mot ImageNet som är en referensdatabas för objektsigenkänning. Med endast 512 kB minne uppnåddes 70 procents precision, vilket man, enligt Han är först med.

– Det går inte att skala ned hur som helst från ett AI-nätverk i en mobil till en mikrokontroller i en IoT-enhet. Det kräver ett helt nytt designsätt. Vi har lyckats designa en funktion för objektsklassificering med bara drygt 120 kB minne, säger professor Han. Varje år pressar vi gränserna, och snart når vi 30 kB.

Eftersom ny data kommer in från sensorerna kontinuerligt måste ibland hela modellen tränas om. Målet är att AI-modellerna ska tränas direkt i enheten utan inblandning av en server. Problemet är att de små enheterna

längst ut i nätverket har begränsat minne. För att lösa detta används TinyTL (Tiny transfer learning). Han hävdar att det inte är antalet parametrar i modellen som är minneskrävande utan aktiveringarna. TinyTL möjliggör begränsningar i mängden aktiveringar vilket kan minska minnesbehovet från 300 MB till 16 MB men ändå uppnå 90 procents korrekthet vid objektsklassificering.

– En annan svårighet med deep learning är datainsamlingen. Det kan ta flera år att samla in data och att annotera det. Tillgång till begränsade datamängder innebär att AI-modellerna presterar dåligt. Med vår teknik kan vi prestera bra även med begränsad data. Det kan räcka med bara hundra bilder för träning. Ett applikationsområde är självkörande bilar där mycket mindre beräkningsresurser då krävs, förklarar professor Han.

Song Hans grupp forskar även på livslångt lärande för IoT-enheter och på kvantmaskininläring. Kan det finnas en kvantfördel i någon av de uppgifter en AI utför? De neurala nätverken för natural language processing, NLP kan vara mycket stora så där kanske det finns en kvantfördel? Gruppen studerar också hur man skulle kunna öka användningen av AI inom vetenskapen. Kan det vetenskapliga arbetet förbättras om AI används för att göra nya vetenskapliga upptäckter?

»En annan svårighet med deep learning är datainsamlingen. Det kan ta flera år att samla in data och att annotera det.«

SENSOR I 2D-MATERIAL KAN PLACERAS DIREKT PÅ HUDEN

– Framtidens elektronik kommer att vara böjbar och lättintegrerad där komponenter med olika funktion staplas på varandra. Det kommer att skapa helt nya möjligheter bland annat för edge computing, menar professor Jeehwan Kim som forskar på framtidens elektronik. För att nå dit forskar hans grupp inom tre huvudområden.

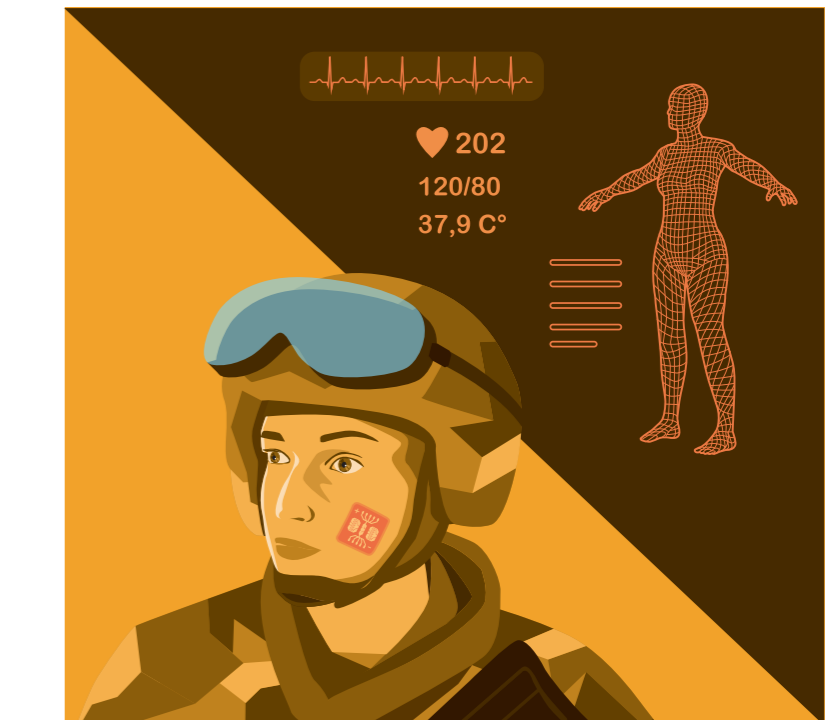
- Hur kan vi skapa de tunna elektronikkomponenterna i 2D material?
- Hur kan vi integrera komponenterna?
- Hur ska framtidens neurala nätverk designas?

Funktionella membran

Under de senaste sex åren har Kims grupp bland annat utvecklat tekniker som de kallar för remote epitaxy och 2D material-based layer transfer. Med hjälp av de teknikerna så kan man enkelt skapa mycket tunna halvledarstrukturer i III- och V-material, till exempel galliumarsenid, GaAs och galliumnitrid, GaN. De kallar detta för funktionella membran. Genom en ny typ av heterogen integration kan de sedan placera olika typer av komponenter ovanpå varandra. Eftersom chipen är så oerhört tunna och saknar den stela kiselplattan, substratet som traditionella chip bygger på så blir de böjbara och kan placeras till exempel på huden.

Han berättar att komponenter som idag är konstruerade med 2D-material är i mikrometerstorlek. Kims grupp försöker utveckla tekniken till waferstorlek, cirka 5 cm i diameter i detta fall, i vilket oorganiskt material som helst. Han hävdar att hans forskargrupp är ensam i världen om att få fram 2D-material i den storleken.

Gruppen har skapat ett funktionellt membran i GaN som fungerar som en



sensor som kan placeras på huden. Sensorn behöver inget batteri eller något externt chip, och det kommunicerar trådlöst. Sensorn kan samla in olika typer av information från huden, analysera svett, muskelaktivitet, ögonrörelser, temperatur med mera. Man kan också läsa av signaler från hjärnan vilket i framtiden kan bli en viktig komponent i framtidens brain machine interface, BMI.

Kim menar vidare att 3D-integration är en viktig trend på grund av utrymmesskäl. Genom att integrera på höjden får man plats med väldigt mycket fler komponenter på samma yta. Inom området edge computing hävdar han att det är nödvändigt att stapla komponenter på varandra och att

komponenterna är flexibla och böjbara. Data kan samlas in och bearbetas direkt i IoT-enheten. Han menar att elektronikindustrin har varit helt fokuserad på waferteknologin, men för framtiden måste vi börja fundera på böjbara och stapelbara komponenter.

Platsbrist driver utvecklingen av 3D-chip inom företag som Intel och Samsung. Även inom AR/VR behövs 3D-integrerade komponenter för att få plats med mer information per pixel. Displaytekniken behöver 3D-integration av de elektriska komponenterna, där RGB delarna staplas på varandra. Genom att använda samma staplingsbara teknik har forskarna utvecklat världens minsta fullfärgs-LED. ▸

När flera funktioner placeras i samma komponent samt att flera böjbara komponenter kan placeras lite var som helst så ökar insamlingen av datamängderna, och därmed behovet av att utföra snabbare beräkningar längst ut i nätverket. Kims forskargrupp studerar därför så kallad neuro-morfisk hårdvara.

Han menar att memristorer är en lämplig komponent eftersom dessa kan efterlikna hjärnans synapser eller

vikterna i synapserna. Genom att använda memristorn som utgångspunkt försöker man efterlikna hjärnans parallella arkitektur och analoga sätt att arbeta. Memristorns funktion gör minnesbaserad datorarkitektur lovande för realiseringen av neuromorfa system.

En memristor kommer ihåg vilken spänning den hade, och detta värde blir vikten eller motsvarar hur stark kopplingen är mellan två synapser.

Men problemet är att denna vikt inte sparas någon längre tid då materialet i den artificiella synapsen inte är stabilt enligt Kim. Kims forskargrupp har utvecklat ett sätt att förbättra memristortekniken genom att använda kristallint kisel och kiselgermanium, och skapa kontrollerade så kallade disklokationer för att styra signalerna på ett mer kontrollerat sätt i de artificiella synapserna, memristorerna.

SATSNING PÅ BÄTTRE PROCESSORER HAR GETT SÅRBARARE HÅRDVARA

Professor Mengjia Yan forskar på hårdvarunära säkerhetsmekanismer i ett lager som kallas mikroarkitekturen, vilket är under operativsystemet, OS men ovanför den mekaniska nivån. Hon förklarar att i en generell systemstack så är applikationslagret överst, med till exempel programmet Word, sedan OS-lagret med till exempel Windows eller Linux och sedan hårdvarulagren längst ned.

– Det är viktigt att hårdvarulagret är säkert, vi måste kunna lita på hårdvarulagret annars kan inte systemet som helhet anses säkert. Alla de andra lagren ovanför måste kunna lita på hårdvaran för att kunna utföra sina operationer och använda sina säkerhetsmekanismer, förklarar Mengjia.

2018 upptäckte olika forskargrupper, oberoende av varandra, ett par hårdvarurelaterade sårbarheter. Dessa sårbarheter kom att kallas Spectre och Meltdown. Sårbarheterna beror på ett

antal optimeringsmekanismer som är inbyggda i moderna CPU:er. Enligt Mengjia anses dessa sårbarheter vara de värsta CPU-buggarna någonsin eftersom de kan angripa i stort sett all CPU-hårdvara, från mobila enheter till servrar. Det går inte heller att se om ett system blivit attackerat eftersom attacken inte lämnar några spår i loggfiler som mjukvarubuggar gör. Fixar för denna typ av buggar bromsar dessutom systemen, säger hon.

– Spectre och Meltdown bryter minnesisoleringen mellan processer vilket är en viktig säkerhetsmekanism. Olika mjukvaruprocesser i olika säkerhetsdomäner ska inte komma åt varandras data. Spectre och Meltdown bryter denna minnesisolering. Med hjälp av Spectre och Meltdown kan en hackare till och med komma åt minnet och informationen i processorkärnan, kernel, som till exempel lösenod och annan känslig data från andra program

som körs på samma system, förklarar Mengjia Yan.

– Varför har vi så många hårdvarurelaterade sårbarheter i våra system frågar sig Mengjia? Orsaken är bland annat att datorindustrin har varit så fokuserad på att tillverka mindre och snabbare processorer. Det har gjort att vi har mindre och energisnålare processorer idag. Generell hårdvarusäkerhet har inte varit en faktor man tagit hänsyn till under designen. Det är därför vi ser att säkerhetsmekanismer oftast implementeras i mjukvarulagret eller på krets nivå. Hennes forskning går ut på, att överbrygga mjukvarulagret och hårdvarulagret, för att möjliggöra säkerhetsdesign som tar hela strukturen i beaktande i designprocessen.

Mengjia Yans forskargrupp har ett övergripande säkerhetsperspektiv när man studerar nya datorarkitekturer. De har två teman i sin forskning.

- Det första temat handlar om att förstå hur hårdvaran har designats för att kunna identifiera nya sårbarheter och brister. Mengjia Yan anser att hårdvaran är i stort sett en svart låda jämfört med mjukvaran. Orsaken till det är att det är svårt att veta exakt hur alla transistorer är sammankopplade. Man behöver göra en hel del re-engineering för att förstå hårdvaran.
- Det andra temat handlar om att designa nya försvarsmekanismer baserat på den detaljerade kunskapen om hårdvaran, men som samtidigt inte bromsar systemet. Att kombinera dessa två teman är inte lätt.

Data i särskilt minne

Spectre och Meltdown är inga riktiga hårdvarubuggar, menar Mengjia Yan. De attackerar en viktig funktion i processorns mikroarkitektur som kallas speculative execution, spekulativ exekvering vilket är en viktig optimeringsfunktion för att förbättra processorns prestanda. Det är en funktion som funnits i processorer i nästan 20 år.

Enkelt förklarat innebär spekulativ exekvering att en processor, CPU, utför en serie uppgifter innan den uppmanas att göra det. Den gissar vilka programinstruktioner som ska exekveras. Syftet är att ha informationen redo om den behövs vid något tillfälle längre fram i exekveringsprocessen. Det är inom dessa olika programsekvenser i den spekulativa exekveringen som det finns möjlighet att komma åt data som egentligen inte borde vara tillgängliga.

Enligt Mengjia Yan är det endast enkla mikrokontroller eller väldigt enkla ARM-processorer som inte använder sig av spekulativ exekvering. Ju mer avancerade chip ju mer aggressivt använder de spekulativ exekvering.

Mengjia Yans forskning har resulterat i en försvarsmekanism som döpts till Invisible Speculation, InviSpec vilken ska förhindra Spectre-attacker. Idén bakom InviSpec är att delar av den spekulativa exekveringen görs icke synlig för andra



processer genom att data lagras i ett särskilt buffertminne och inte i de olika cacheminnen som normalt används. InviSpec togs fram innan de olika attackvarianterna blev allmänt kända. Försvarsmekanismen designades inte utifrån någon specifik typ av attack, utan de generaliserade sårbarheterna kring spekulativ exekvering, eftersom det är väldigt vanligt, och utifrån det skapade de en generell försvarsmekanism.

Svårt att ändra processor-designen

Mengjia Yan berättar att hon forskade på hårdvarusäkerhet redan innan Spectre och Meltdown blev allmänt kända. Då fick hon inte särskilt stor uppmärksamhet för sitt arbete. Industrin fokuserade mest på prestanda. Men i och med att dessa sårbarheter upptäcktes så är det ett stort intresse för hårdvarusäkerhet idag.

En svårighet med att lösa hårdvarurelaterade säkerhetsproblem är att det krävs designförändringar i själva processorn vilket kan ta flera år. När väl en ny design är införd så ska processorhårdvaran produceras och införas i nya it-produkter. Tillverkare som Intel och AMD använder så kallad mikro-kod för att styra vissa egenskaper hos processorn och vissa hårdvarurelaterade säkerhetshål kan täppas till genom att tillverkaren uppdaterar denna mikro-kod, men det är långt ifrån lösningen på problemet.

VAKUUMELEKTRONIK I NANOSTORLEK

Den vanliga uppfattningen är att vakuum-elektronik är klumpig, energislösande, dyr och föråldrad. Men inget kunde vara mer fel enligt Dr Donnie Keathley på MIT Research Laboratory of Electronics. Det finns flera positiva egenskaper med vakuum-elektronik. Vakuumbaserad teknik är tålig mot joniserande strålning och lämpar sig bra för rymdtillämpningar och andra krävande miljöer som i kärnreaktorer. Då elektronerna rör sig friktionsfritt i vakuum så blir de mycket snabbare än i halvledande

material och mer temperaturokänsliga. Han menar att man kan göra en del intressanta optoelektroniska applikationer med denna teknik. Keathleys grupp utvecklar elektronik som opererar på samma frekvens som ljusvågor. Forskningen går ut på att utveckla platta vakuumkomponenter, målet är att komma ned till 10 nm tillverkningsteknik.

– Vi tittar på hur vi kan tillverka vakuumelektroniken på integrerbara chip i nanostorlek vilket skulle göra dessa chip mycket snabbare än vanli-

»En positiv effekt av miniatyriseringen är att energiförbrukningen går ned och även värmeutvecklingen blir ett mindre problem.«

ga chip, upp till PHz frekvenser, säger Keathley.

– En positiv effekt av miniatyriseringen är att energiförbrukningen går ned och även värmeutvecklingen blir ett mindre problem.

Energisnålt

Genom tillverkning på nanonivå blir avstånden så små att väldigt lite energi behövs och sannolikheten att en elektron skulle krocka med en gasmolekyl på vägen är väldigt liten så vakuumnivån behöver inte vara särskilt krävande. På grund av luftgapet är komponenten mindre känslig för joniserande strålning och kan man uppnå kall fältemission blir komponenten mindre känslig för temperaturer enligt Keathley.

Keathleys grupp tittar framförallt på hur man kan göra dessa vakuum-elektronikkomponenter platta. Platt vakuumelektronik blir enklare att integrera, och det blir enklare att konstruera de små övergångarna.

Mycket av forskningen går ut på att studera de fysikaliska egenskaperna hos komponenterna.

Forskning bedrivs på vilka material som är lämpliga för vakuumelektronik. Keathley menar att man inte fullt ut förstått elektronemissionen i dessa komponenter.

Elektroner i ett vakuum

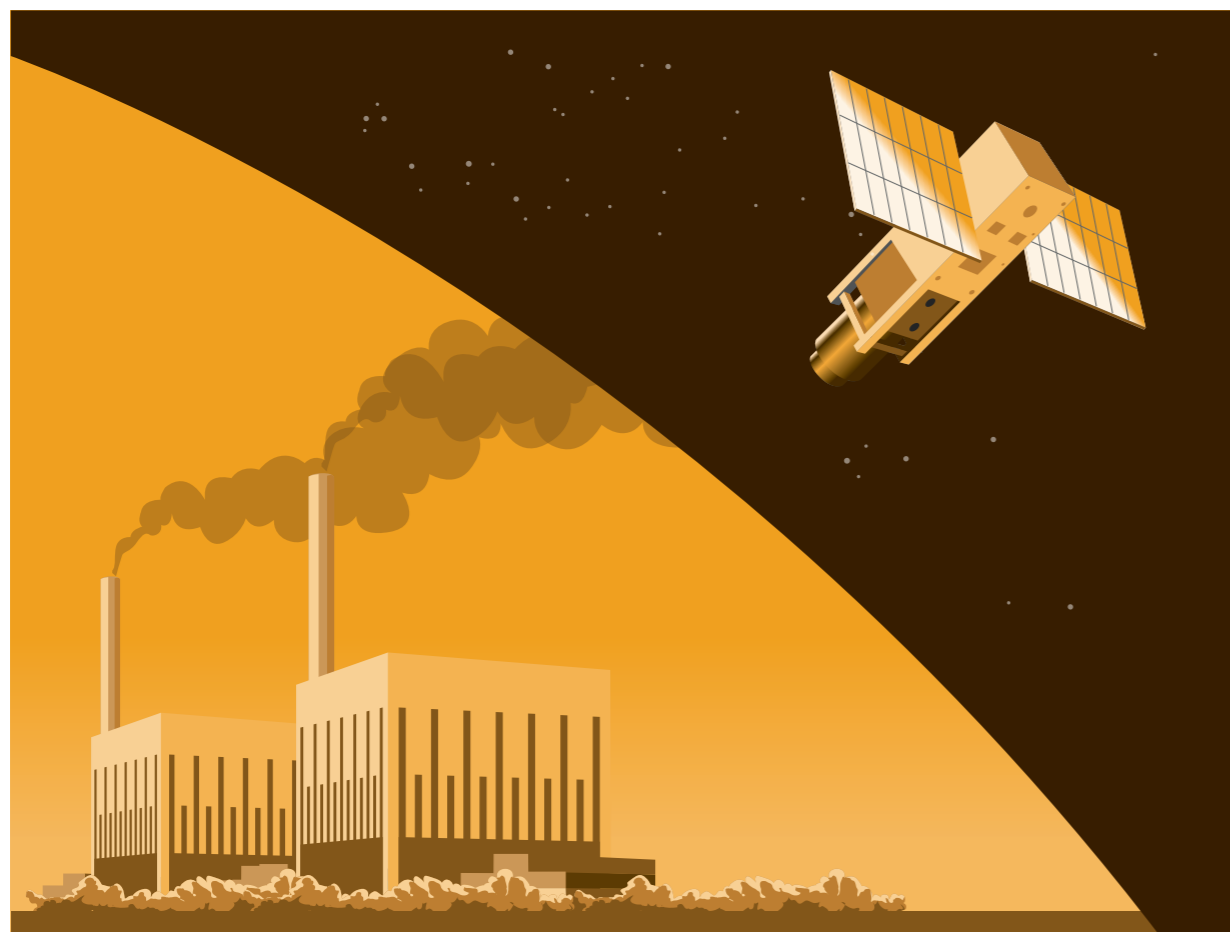
Egenskaperna i materialen som används för vakuumelektronik är viktiga och Keathleys grupp har studerat bland annat egenskaperna i guld, Au och titannitrid, TiN. Titannitrid har i experiment visats sig ha mycket bra egenskaper i höga temperaturer och

man ska testa detta vidare i MIT:s kärnreaktorlaboratorium.

Den här typen av teknik kan i förlängningen användas för höghastighetskommunikation i PHz-området. Och han tror också att det finns spännande användningsområden för tekniken inom hyperspektrala sensorer.

– Vi kommer att driva vakuumelektroniken mer mot transistorer och kretsar. Vi vill utveckla demonstratorer för förstärkare, digitala logiska kretsar, och visa att man kan göra dessa komponenter som tål tuffare miljö vad gäller temperatur och strålning.

Med tiden så kommer vakuumtekniken konkurrera med traditionell transistorteknik då tillverkningsmöjligheterna i nano-format har utvecklats enormt de sista decennierna, och fördelen är att tekniken inte har någon ledare utan elektronerna far fram i ett vakuum, avslutar Keathley. □

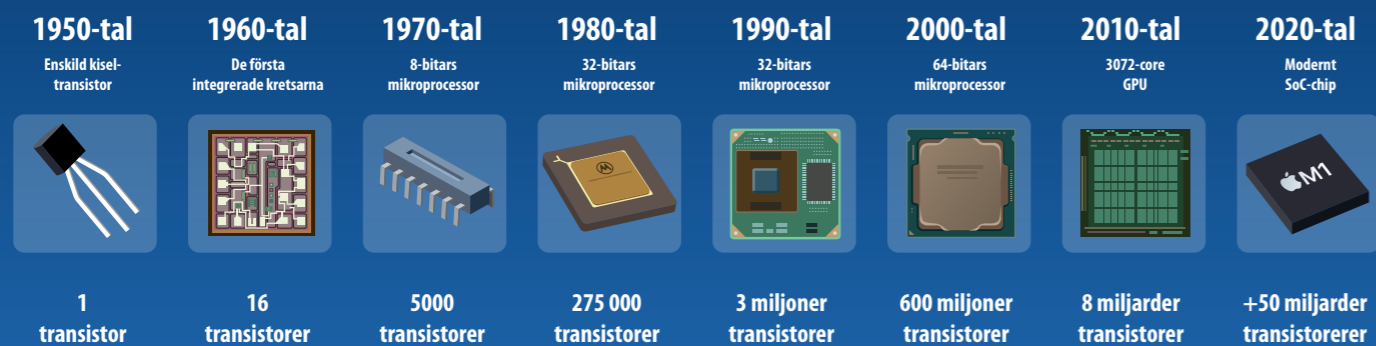


Mindre billigare snabbare!

Moore's lag uppkallad efter en av Intels grundare Gordon E Moore, betecknar det fenomen att antalet transistorer som får plats på en integrerad krets växer exponentiellt vilket har visat sig kunna upprätthållas ganska väl – med en ungefärlig fördubbling var 24:e månad sedan 1960-talet. Men datorindustrins jakt på denna gyllene graal har inneburit att transistorerna nu börjar bli så små att fysikens lagar börjar sätta gränser i form av elektronläckage och andra oönskade kvantfenomen.

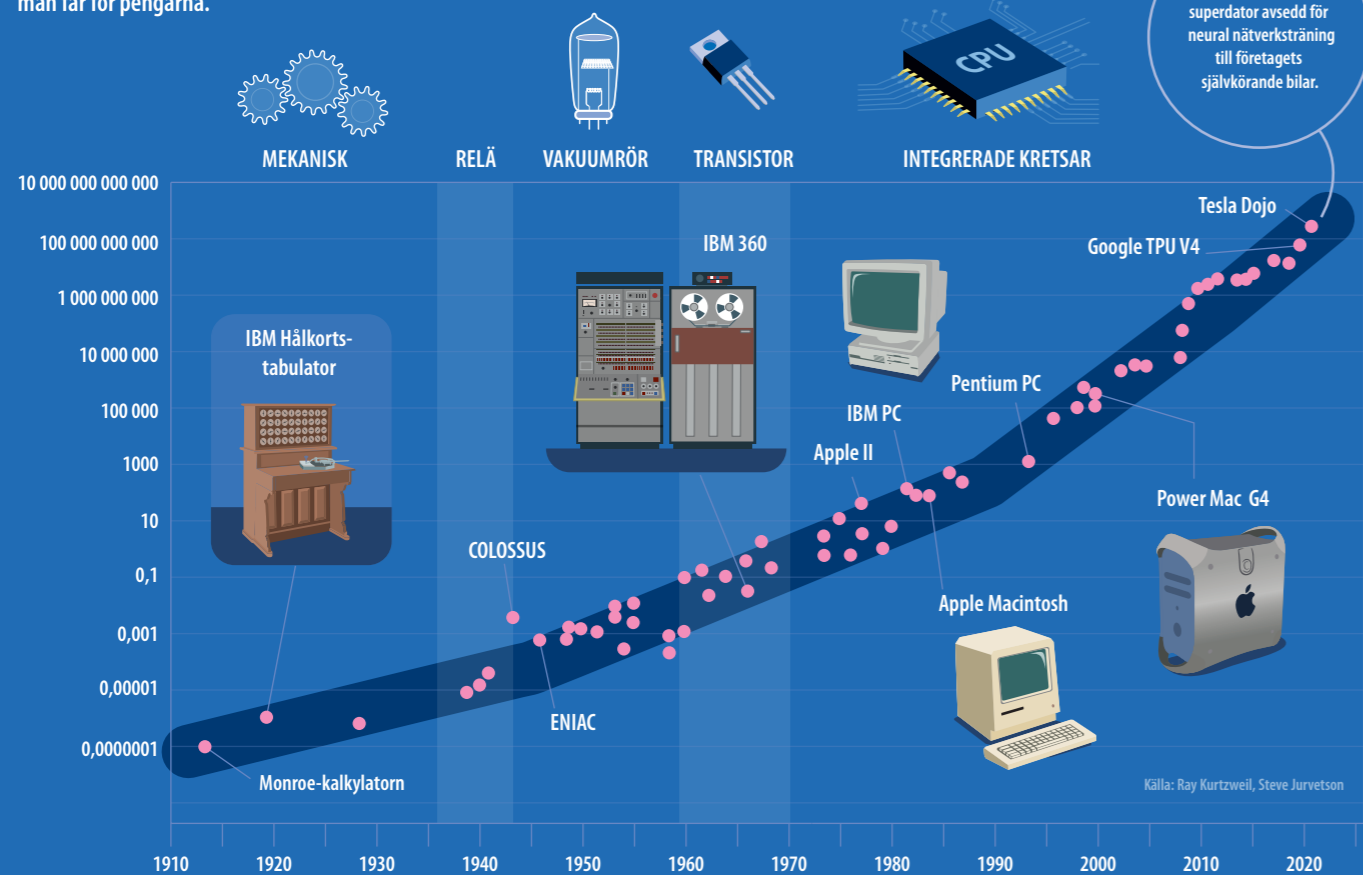
Utveckling av antalet transistorer på integrerade kretsar

Utvecklingen har gått från enskilda ihopkopplade transistorer i de tidiga datorerna till miljardtals transistorer på integrerade kretsar.

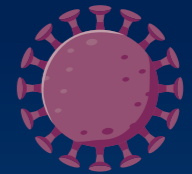


Beräkningar per sekund per dollar

Ett annat sätt att se Moore's lag är att se hur mycket beräkningskraft man får för pengarna.

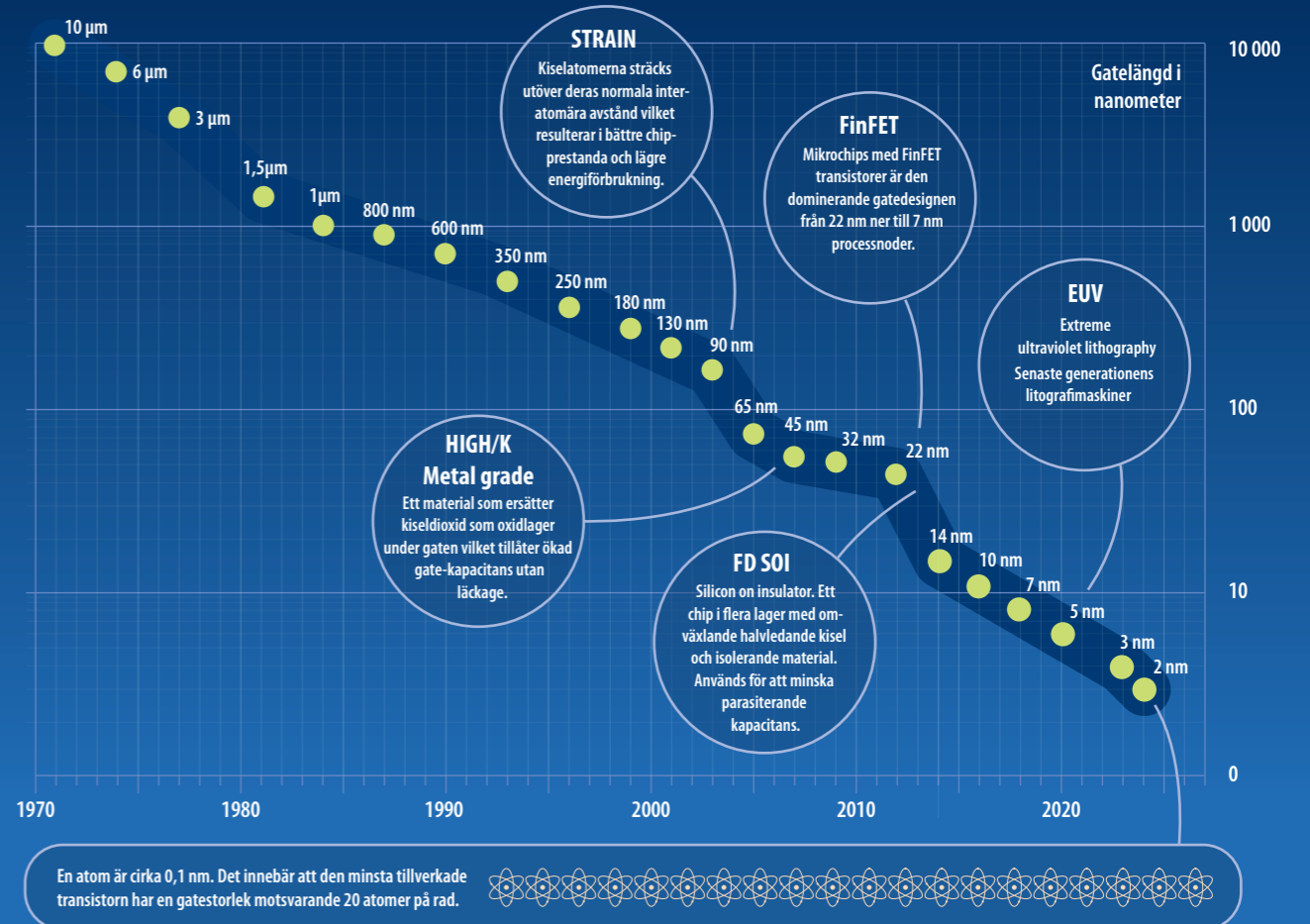


Fälteffekttransistorers nedskalning



De flesta virus har en diameter mellan 10 och 300 nanometer.

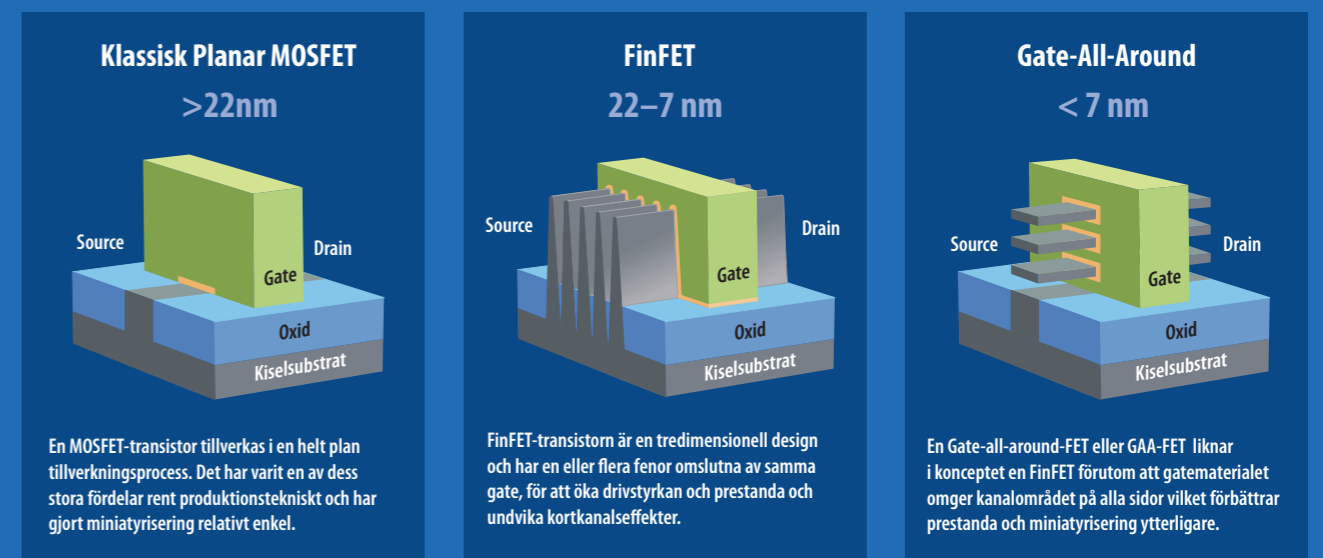
En rad innovativa teknologier har tillåtit att Moore's lag har kunnat upprätthållas. Allt fler ämnen i det periodiska systemet integreras i kiselsubstratet och sinnrika designknep gör att jakten kan fortsätta ytterligare en tid.



En atom är cirka 0,1 nm. Det innebär att den minsta tillverkade transistor har en gatestorlek motsvarande 20 atomer på rad.

Att designa sig runt problem

Det gick ganska bra att förminska MOSFET-teknologin enligt Moore's lag fram till slutet av 2000-talet. Sedan började det uppstå problem med så kallade kortkanalseffekter, ett fenomen som ökar strömförbrukningen och försämrar transistorers prestanda. Man var tvungen att lämna den helt plana tillverkningsprocessen och introducera den tredimensionella field-effect transistoren FinFET.

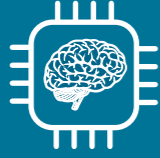


Militära halvledarkomponenter

Militära system består generellt av tre huvudgrupper av halvledare. Kiselkomponenter är vanligast även i den militära världen men för vissa funktioner krävs mer exotiska material för tillräcklig prestanda och robusthet.

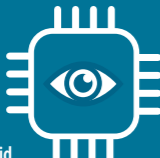
Systemfunktionalitet

Dussintals halvledarkomponenter krävs ofta för att få ett systems grundläggande funktioner att fungera, såsom mikroprocessorer, styrsystem, aktuatorer, grafikkort och minneskretsar. Här duger ofta kiselkomponenter.



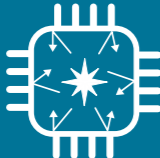
Sensorer

Radar, lidar, optisk och termisk avbildning är exempel på den flod av sensordata som samlas upp på slagfältet. För maximal upplösning och verkningsgrad används ofta halvledarmaterial som galliumarsenid och galliumnitrid.



Kommunikation & positionering

Utan position och kommunikation är det nästan omöjligt att uträtta någonting på det moderna slagfältet. Precision och höga datahalter är nödvändigt för att överträffa motståndarens beslutsloop. Här kan exotiska halvledarmaterial som exempelvis indiumfosfid användas.



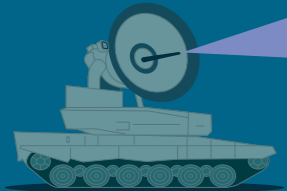
Cyberkrigföring



Slagfältet blir ett högvärdigt mål för cyberattacker. Men traditionella mjukvarubaserade skydd kanske inte räcker. Halvledarkomponenter med inbyggda funktioner mot cyberangrepp kan komplettera brandväggar.

HPM-vapen

Hoten från HPM, high power microwaves ökar i takt med att digitaliseringen ökar. Det gäller både det civila och militära nätverken. HPM-vapen kan användas mycket lokalt - buret i en väska - upp till till stora system som ryms på fordon eller i en container. En kärnladdning kan slå ut alla halvledarkomponenter över en hel landsända.



Utan halvledare stannar slagfältets nätverk

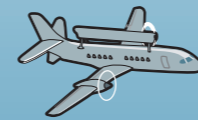
I krig vinner den som fattar rätt beslut fortare än motståndaren. I dag utkämpas kriget i flera domäner – från rymden till havsbotten och i cyberarenan. I informationshällets krig är allt sammankopplat i nätverk och utan halvledare skulle detta nätverk inte kunna fungera. Halvledare finns överallt. I satelliten, i sensorn på havets botten och i robotens målsökare.

Internet of military things

I det civila samhället motsvaras detta av vad som kallas "Internet of Things". Den enorma mängd enheter som nu kopplas upp mot internet. Allt från pulsklockor och kylskåp till sensorer i kraftverk och fordon.

Det är ofta mindre militära system som tar sig ända fram till ett konfliktområde och får en första bild av vad som händer. Problemet är att små system har små batterier och dålig beräkningskapacitet.

Ett sätt att lösa detta är att skapa lokala beräkningsmoln som tillsammans delar på energifördelning och beräkningar för exempelvis mätdata.

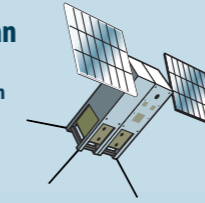


Flygarenan

De flesta större flygande plattformar är packade med kraftfulla sensorer och beräkningskapacitet



Rymdarenan
Sensordata och kommunikation



The Cloud

Data från den främre djupzonen kan även skickas till en bakre djupzon där ännu större plattformar eller stridsledning kan utföra tunga beräkningar och djupare analys.

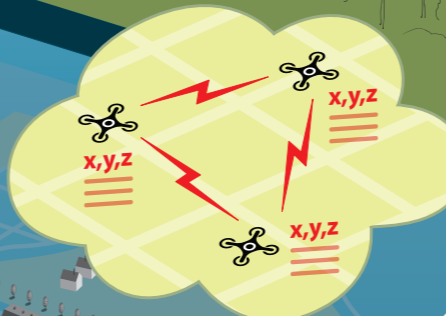


The Edge

Både framme i själva uppdragsområdet och i den främre djupzonen kan kraftfulla plattformar som stridsvagnar, eller helikoptrar med god beräknings- och lagringskapacitet – snabbt analysera sensordata och skicka tillbaka instruktioner till konfliktområdet i nära realtid.



Lokalt beräkningsmoln

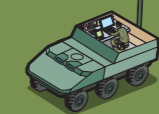


Beräkningskapacitet

– en strategisk & taktisk resurs

Stor beräkningskapacitet och ett kraftfullt nätverk blir avgörande för att kunna konkurrera på det framtida slagfältet. Speciella bepansrade fordon med kraftfulla datorer skulle kunna röra sig i områden där behov uppstår.

Bepansrade serverhallar



Mängder av halvledarkomponenter finns i stort sätt alla system på slagfältet

Konfliktområde

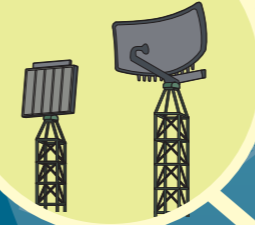
Autonoma flygande farkoster



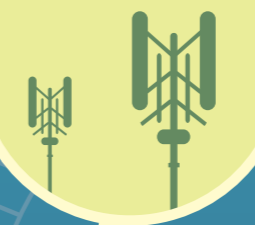
Soldatens utrustning



Radarsystem



Kommunikation



Målsökare



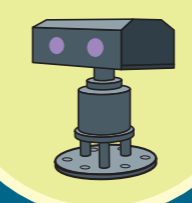
Stora plattformar



Vapensystem



Sensorsystem



Autonoma markgående farkoster



Autonoma undervattensfarkoster



HÖGODDSARE I KISTA SKAPAR DETEKTORER FÖR VÄRLDEN

När Sverige minskade på ambitionerna att bli ledande på mikrovågselektronik kunde företaget IRnova surfa vidare på vågen. Vid ett viktigt vägval satsade man inte på den säkra hästen utan valde en högoddsare. Den springer nu in pengar och det som började som en forskargrupp är nu ett växande företag i Kista med över 30 anställda. Linda Höglund är forskningschef.

Ulrika Nordén är en av grundarna till IRnova 2007 och sedan 2010 VD. Hon har varit med på hela resan och har en bakgrund som tek-

nisk fysiker och var produktionschef vid forskningsinstitutet Acreo som ingår i forskningsinstitutet Rise.

– Vi var en forskningsgrupp inom Acreo och vi var fyra som lärde oss att starta företag, säger Ulrika Nordén. Till en början var det ont om pengar. Vi började med finansiering från Vinnova, men riktig fart blev det inte förrän en extern finansör kom in i bilden och nu har vi lämnat Acreo och Rise. Företaget har utvecklats i Electrums laboratorium och har vuxit efter hand i Kistagången.

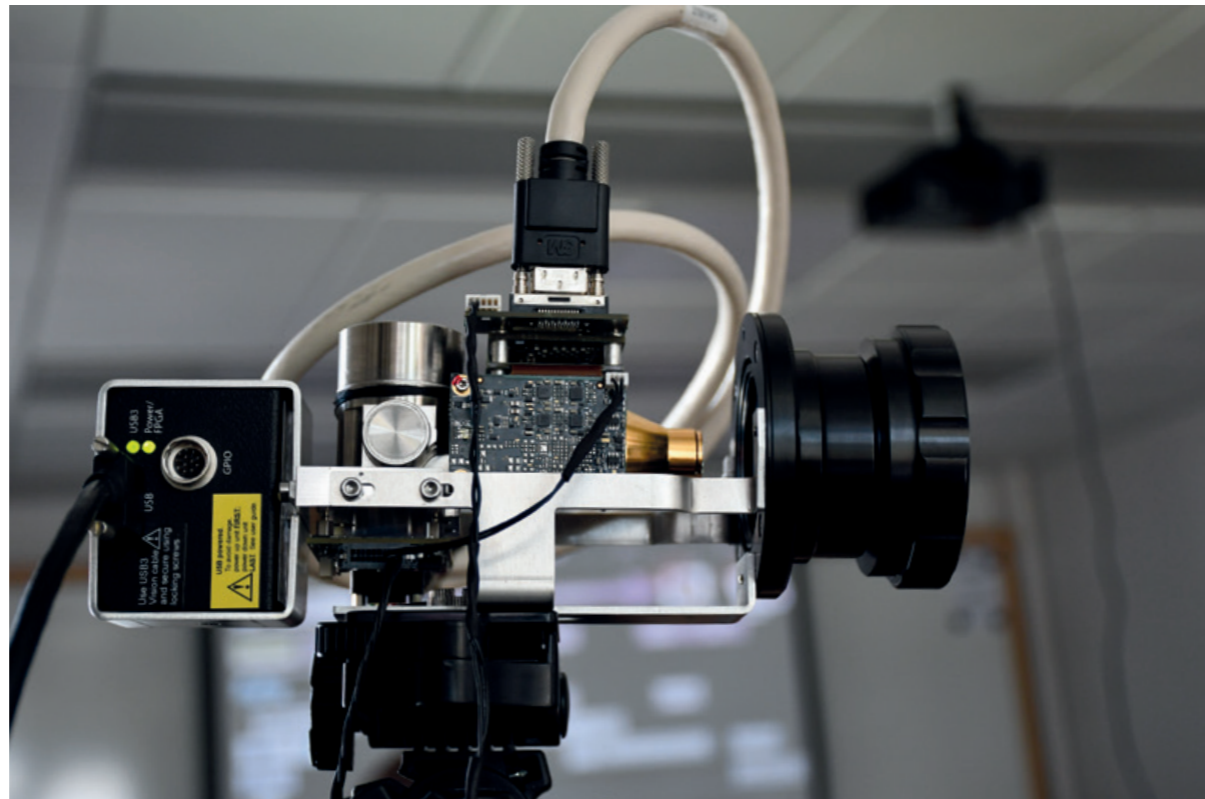
Höga svenska ambitioner

Men vägen dit har varit lång. Det började för 35 år sedan med institutet för mikrovågselektronik som sedan blev Acreo. Då fattades ett beslut i Sverige att IR skulle vara en strategisk teknologi som skulle finnas i landet. Ambitionen var att bli självförsörjande.

– Även om bara materialet köptes utifrån – från USA – innebar det ett beroende av andra länder. Målet angavs tidigt att man skulle göra sitt eget material, säger Ulrika Nordén. Design och utveckling av chipet skulle göras i Sverige. Vi skulle vara oberoende i hela kedjan fram till en färdig produkt. Bakom den ambitionen låg statliga forskningsmedel i kombination med industrin, Försvarets materielverk, FMV och Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI.

– Hela försvarsindustrin har varit involverad och vi har gjort sensorn. Processerna att få fram sensorn tar månader och sedan lika lång tid att paketera.

Linda Höglund började också sin bana på Acreo, disputerade i materialfysik och arbetade senare i drygt fem år i NASAs forskargrupp för IR vid Jet Propulsion Laboratory i Los Angeles. Hon kom tillbaka till IRnova som projektledare och är nu forskningschef och ansvarar för utveckling av nya detektorer på IRnova. ▷



IRnova designar, tillverkar och säljer IR-detektorer (till vänster) som kan användas i IR-kameror för civila och militära tillämpningar. IRnova har tagit fram ett enkelt utvärderingskit med detektor, lins och elektronik (till höger) för att kunder snabbt ska kunna utvärdera IRnovas produkter.

Ulrika Nordén (till vänster) var med och grundade företaget 2007 är sedan 2010 VD. Linda Höglund kom tillbaka till företaget som projektledare och är nu chefschef.

Att få till en bra detektor är ett spel om värme, kyla och upplösning. För att få en väldigt känslig detektor som kan mäta temperaturskillnader på ner till en hundradels grad så behöver den kylas, i vissa fall ända ner till 50 grader Kelvin (-223 grader Celsius). Genom förbättring av både materialdesign och processmetoder kan detektortemperaturen ökas. IRnova arbetar fortlopande med att höja arbetstemperaturen och även med att göra pixlarna mindre så att bildupplösningen kan förbättras.

– Vår detektor arbetar nu vid en temperatur på 150 grader Kelvin. Det är 20 grader bättre än konkurrenterna. Det ger stora fördelar då effektförbrukningen blir lägre, kylaren kan göras mindre och enheten blir mer kompakt.

Företagets hemsida ser nästan ut som en Ikeakatalog. En massa olika detektorer som tycks se ungefär likadana ut. Behövs så många produkter?

– Varje typ av detektor har sitt eget chip. Grundplattan och paketeringen är densamma. Det är bara smådelar som skiljer och det är en av våra styrkor, säger Ulrika Nordén.

»Varje typ av detektor har sitt eget chip. Grundplattan och paketeringen är densamma. Det är bara smådelar som skiljer och det är en av våra styrkor.«

Kriget ökar efterfrågan

Företaget växer, men de rätta ingenjörerna växer inte på träd.

– De ska passa in i laget och det tar rätt lång tid att bli upplärd. Det tar minst ett år att bli varm i kläderna och klara maskinerna i labbet, säger Ulrika Nordén. Doktorerna som utbildas vid KTH är dock vana vid miljön och labbet fungerar lite som en plantskola.

En stor del av exporten går till civila kunder. Det är stor efterfrågan i Asien på gasdetektorer som sitter i ställverk. De gamla ställverken läcker och det ska i varje ställverk finnas ett visst antal detektorer. En annan tillämpning är små detektorer som sitter i gimbaler i drönare.

Men till stor del förknippas IR-detektorer med militära tillämpningar som till exempel i målsökare för robotar. Nu när kriget åter har kommit till Europa ökar intresset för företagets produkter.

Det speciella med IRnova är att man bedriver försvarsforskning i en öppen miljö i Electrums laboratorium. De känsliga delarna av forskning och produktion hålls i slutna rum.

Ulrika Nordén säger att det är en bra miljö att verka i. Har man inte tillgång till egen utrustning tar det tid att vänta på resultaten. Här kan vi testa och testa igen och behöver inte vänta.

FMV bestämde våglängd

Försvaret spelade tidigare en stor roll i utvecklingen av mikrovågsteknik. FMV beslutade en gång att det av klimatskäl var långväg som gällde för IR. Sverige var först i världen med att sätta QWIP- teknologin i produktion för långvägens skull. Mellanvägsdetektorer används i stor utsträckning i militära system runt om i världen, men i kalla klimat som i Sverige krävs långväg. För att välja rätt detektor för olika applikationer spelar även hastigheten roll. Det är stor skillnad om detektorn ska användas i ett snabbt flygplan eller i en långsam helikopter. En annan III-V teknologi är T2SL, som kan användas i både långväg och mellanväg.

En tredje teknologi, MCT, är dominerande och ansågs vara den säkra häs-

ten. Enorma summor har investerats i MCT sedan 1950-talet, men teknologins kritiker hävdar att den ännu inte levt upp till förväntningarna. De stora satsningarna gör att det är svårt att byta till något annat (se grafik sid 50).

– De andra i branschen fnyste åt T2SL och QWIP. Det var MCT som gällde, säger Ulrika Nordén. Jag satt i styrelserummet när vi 2010 fattade beslutet att satsa på T2SL och inte någon annan teknologi. Det var omstritt, men vi trodde på att T2SL och QWIP tillhörde framtiden. I nya system vill man ha framtida teknologier. Vi satsade på en högoddsare och nu skördar vi frukterna och har stor efterfrågan på våra produkter för både militära och civila applikationer. Vi är dessutom redan i rymden med en QWIP-detektor

som sitter i en jordobservationssatellit och är i full färd med att utveckla nästa generations HD-detektorer baserat på T2SL för rymden.

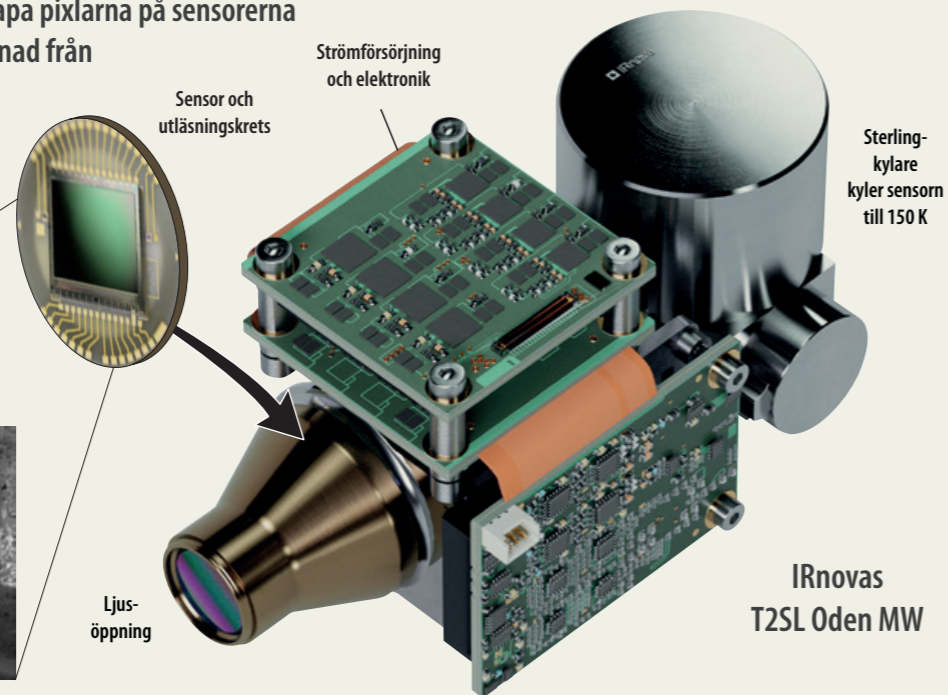
– Ambitionen var att Sverige skulle vara självförsörjande med alla delar som krävs för detektorproduktionen. Där är vi inte idag, men vi siktar på det. Vi är de enda i Europa med T2SL. Vi började med detta 2005 och det har tagit lång tid att komma hit. Nu börjar alla i Europa att få upp ögonen för T2SL. Den finns och den fungerar. Och den finns i Sverige. Vi ligger på en mognadsgrad TRL 7 eller 8 på den nio-gradiga skalan, säger Ulrika Nordén. **Vad har hänt om tio år, vart är man på väg?**

– Ännu har vi ingen HD-upplösning, men vi siktar på det. Det är först nu som det finns en marknad. Att ta även ett litet steg kräver mycket forskning. I framtiden hoppas vi ha en HD-detektor som är stabil och som tillverkas i stora volymer. Vårt T2SL-material har vi tagit till fler våglängder. Det ger fler tillämpningar inte minst militära. Vi måste ha resurserna samlade i Europa. Vi går mot fler och mindre pixlar och flera våglängder. □

»Har man inte tillgång till egen utrustning tar det tid att vänta på resultaten. Här kan vi testa och testa igen och behöver inte vänta.«

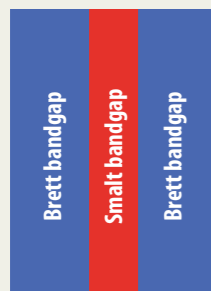
IRnova förvandlar natt till dag

IRnova använder två olika kvantbrunnsteknologier – vilka förklaras på sidan till höger – för att skapa pixlarna på sensorerna till sina IR-detektorer. Till skillnad från äldre teknologier drar de mindre ström, behöver mindre kylning och kan avläsa större delar av våglängdsområdet.

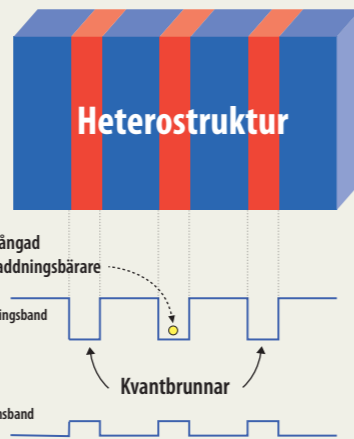


Kvantbrunnar

Ett enkelt kvantbrunnssystem kan konstrueras genom att infoga ett tunt lager ett halvledarmaterial med ett visst bandgap mellan två lager av ett material med ett annat bandgap.



Eftersom bandgapet för det inneslutna materialet i detta fall är lägre än det omgivande så skapas en så kallad kvantbrunn i det inneslutna materialet. Denna förändring i bandgapsenergi över strukturen gör att laddningsbärare (både positiva hål och negativa elektroner) med låg energi kan fångas in i kvantbrunnen.



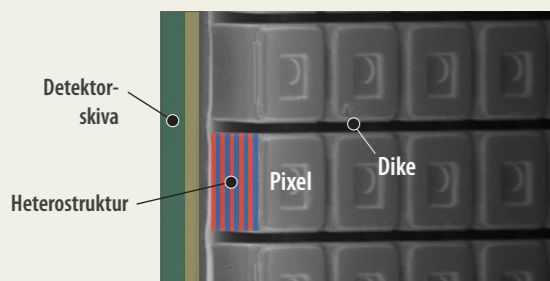
Genom att trava flera materiallager med omväxlande breda och smala bandgap får man en heterostruktur med ett stort antal kvantbrunnar

Kvantbrunnar kallas "brunnar" dels på grund av deras förmåga att fånga in laddningsbärare, som en brunn skulle fånga in vatten, och dels på grund av deras utseende när de visas i energibanddiagram (där brunnen utgör en lägenivå för laddningsbärare).

Att fånga laddningsbärare på detta sätt möjliggör en specifik energimanipulation som är användbar när man konstruerar IR-sensorer.

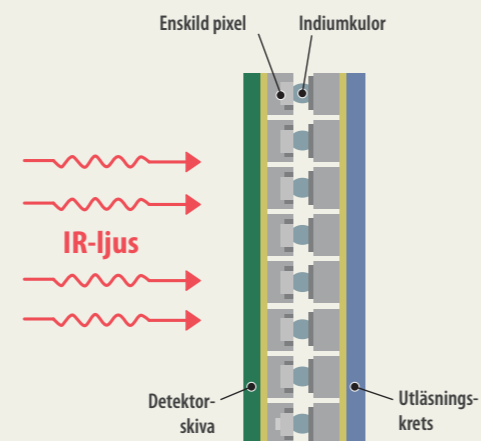
Varje pixel sin egen heterostruktur

Bilden nedan visar ett antal pixlar på en av IRnovas IR-sensorer. Först skapas heterostrukturen över hela sensorytan och därefter etsas material bort som skapar diken mellan varje pixel. Varje pixel får på så sätt sin egen avskilda heterostruktur.



När själva sensorn är klar monteras den "rygg mot rygg" mot en utläsningskrets. Kontaktytan mellan varje pixel och dess motvarighet på utläsningsidan består av en liten indiumkula.

En typisk sensorupplösning är 640 x 512 pixlar.



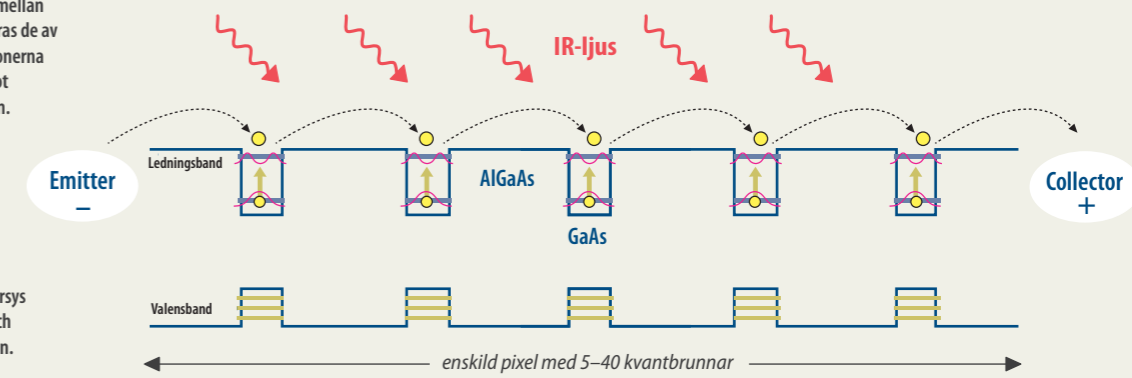
QWIP – Quantum Well Infrared Photodetector

Den ena av IRnovas sensortyper kallas QWIP och använder kvantisering av energinivåer i så kallade typ1-kvantbrunnar. I detta fall ett tunt lager av GaAs (galliumarsenid) inklämt mellan lager av AlGaAs (aluminium-galliumarsenid). Flera kvantbrunnar (5–40) staplas i en heterostruktur mellan två spänningsförsedda kontaktlager (emitter och kollektor) för att skapa en fullständig detektorstruktur.



Lägger man en spänning mellan emitter och kollektor så dras de av ir-ljuset exciterade elektronerna av det elektriska fältet mot kollektorn där de fångas in. Värdet från varje enskild pixel läses av och skapar med de övriga pixlarna i sensorn en färdig bild

Detektionsvåglängden för detektorn kan skräddarsys av GaAs-skiktjockleken och AlGaAs-sammansättningen.



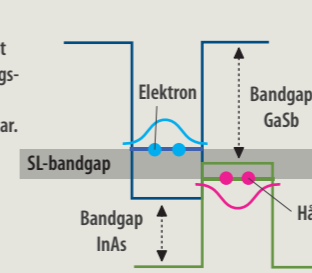
T2SL – Type 2 Super Lattice

En T2SL-sensor kan förenklat beskrivas som en avancerad diod där man med hjälp av ett så kallat supergitter (SL) kan designa vilka bandgap man vill ha. Ett supergitter i T2SL kan bestå av InAs (Indiumarsenid) och GaSb (Galliumantimon).

I ett supergitter överlappar de två materialens bandgap varandra vilket medför att man kan sortera laddningsbärarna – negativa elektroner och positiva hål – i separata kvantbrunnar.

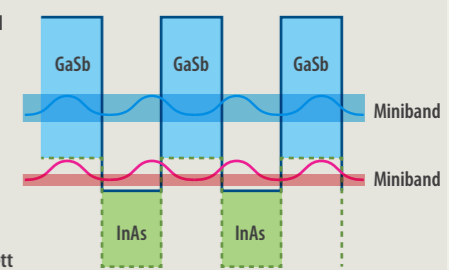
Supergitterbandgapet (SL) bildas mellan den lägsta elektronenerginivån i InAs och den högsta hålenerginivån i GaSb.

Genom att justera tjocklek och sammansättning av de enskilda lagren ändras supergitterbandgapet. På så sätt kan man brett styra inom vilket våglängdsområde sensorn ska verka – från väldigt kort till väldigt lång våglängd.

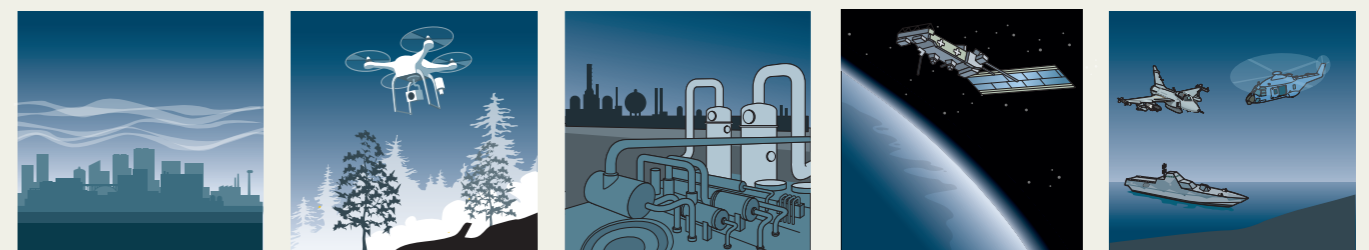


Vågfunktionerna från laddningsbärarna sprids till närliggande lager, vilket orsakar bildandet av miniband över strukturen. Det är en slags tunneffekt vilket möjliggör transport av elektroner och hål i minibanden.

Med dessa transportegenskaper liknar supergittret ett bulkmaterial. Hos QWIP-detektorn transporteras laddningsbärarna i ledningsbandet ovanför kvantbrunnarna.



Användningsområden



Gasdetektion

Sök och räddning

Industriell inspektion

Jordobservation

Militärt

CHIPPEN HÅLLER PLANEN I LUFTEN

Saab bildades för nästan 80 år sedan. Kriget hade brutit ut och Sverige var helt beroende av andra länder för import av militära flygplan. Under decennier av väpnad alliansfrihet växte bolaget och är nu det i särklass största svenska försvarsföretaget. Men Saabs högteknologi är beroende av andra. USA är viktigt men beroendet är större än så. Det är inte själva designandet, det vill säga kretskonstruktörsjobbet som är problemet utan snarare att utveckla processer och teknologier. Utan de internationella teknologiprogrammen för chip skulle Saab precis som i princip alla andra teknikföretag få problem på sikt.

Det säger Sten Gunnarsson, professor vid Chalmers och vid Saab sedan 2017 där han arbetar med teknikstudier, internetutbildning, elektronisk krigsföring och mikrovgsteknik vid Saabs stora anläggning i Järfälla utanför Stockholm med flera tusen anställda.

I Järfälla handlar det om högteknologi i olika former. Forskning, utveckling och tillverkning.

– I Saabs flygande radar Global Eye görs radarn som sitter på taket i Göteborg och alla sensorer som finns i flygkroppen tillverkas i Järfälla, säger Sten Gunnarsson.

Saab köper digitala kretsar i kisel från hyllan och konstruerar egna mikrovgskretsar för försvarstillämpningar.

– Vi gör designen, får tillbaka ett chip eller ett chip i en kapsel. Att ha egen chiptillverkning skulle däremot innebära stora investeringar.

– Kapslingen är ett problem i sig. Det är en flaskhals på vägen mot en färdig produkt. Kapslingsfabrikerna tar emot beställningar på stora volymer. Kapseln ska skydda elektroniken och kapseln är relativt lätt att montera. En nackdel med kapsling är att den i princip alltid försämrar mikrovgsprestandan relativt den prestanda som själva chipet har.

– För att designa chip använder vi som alla andra amerikanska mjukvaruverktyg. USA dominerar marknaden och de amerikanska programmen som stödjer i princip hela världens chipkonstruktion. Vi är också beroende av olika

chip-foundries. Dessa chipfabriker, eller fabbar i dagligt tal, står för själva chipteknologiutvecklingen. Och den bakomliggande chipteknologin får självklart stor påverkan på prestanda hos chippen och hela systemet.

Till skillnad från telekomindustrin så är inte kisel normen för mikrovgskretsar hos Saab. Sten Gunnarsson betonar att det är olikheter mellan försvar och telekom på denna punkt.

– Vi har rymd och försvar på ena sidan och konsumentmarknaden på den andra. Den senare dominerar av kisel inom alla typer av kretsar, men kisel är för oss i försvarsindustrin inte referensen när det kommer till mikrovgsfunktioner vilket många tror. Däremot sitter vi alla i samma båt när det gäller kretsar för digital och mixed-signal – blandning mellan

analogt och digitalt. Där är i praktiken alla beroende av kiselchipteknologier.

En målsökare i en robot är i princip en sändare och mottagare. En radar skickar ut en puls som tas emot.

Då är det intressantare med andra typer av material i halvledare, som galliumnitrid och galliumarsenid.

– Galliumnitrid är utmärkt för många tillämpningar men har fortfarande en del barnsjukdomar och därmed också en utvecklingspotential, säger Sten Gunnarsson. Galliumnitrid tål högre spänningar därför att det har ett stort bandgap. I princip används galliumnitrid i sändaren

många nationsgränser. Finns det inte en risk i att någon manipulerar det på vägen? Det talats om kinesiska chip med bakdörrar som sitter i amerikanska flygplan.

– Det är skillnad på analoga och digitala chip. Ett analogt chip är resultatet av ett hantverk, man ser vad man har och det märks om någon har fixat med chippet. Ett digitalt chip är mer komplext, det är skrivet med kod. Tillverkaren kan lägga in lösa trådar eller fel för att upptäcka om någon kopierat eller stulit designen. Men i de allra flesta fall är det nog inte hårdvaran – chippet – som är

Utvecklingen rusar. Högre prestanda. Nya länder. Högteknologi är också makt. Hur ser framtiden ut?

– När jag var doktorand 2003 fanns knappt Kina på marknaden. Enstaka saker såldes, men de var oftast av dålig kvalitet. Nu har nog Kina hela kedjan liksom USA. Kina har kanske inte de vassaste prylarna på alla områden, men deras utveckling har varit enorm de senaste tjugo åren.

– I framtiden tror jag vi får se ännu mer av avancerade gruppantennor som innehåller en mängd antennlement och där man styr loben, det vill säga



där det är hög effekt och galliumarsenid i mottagaren som ska förstärka den svaga signalen. Men fel utnyttjat kan man till exempel få så kallade minneseffekter med galliumnitrid vilket kan göra att man behöver vänta lite för länge mellan att skicka ut radarpulser.

– Det gäller helt enkelt att ha tungan rätt i munnen när man jobbar med galliumnitrid, vet man vad man gör så är det en fantastisk teknologi, men fel utnyttjat kan man få konstiga effekter.

Och Saab har stor erfarenhet av just galliumnitrid, tillsammans med Chalmers har man jobbat med materialet i över tjugo år, något som gör att företagets kretsar i materialet sticker ut med mycket bra prestanda, även i en internationell jämförelse.

Vägen till ett färdigt chip kan gå över

den svaga länken utan mjukvaran till exempel i flygplanet. Analoga chip används för uppgifter som att ta emot och förstärka signaler. Digitala chip används för beräkningar som för till exempel signalbehandling.

Hur ömtåligt är ett chip?

– Det är delikata saker rent mekaniskt men rätt förpackat tål det ändå en hel del. Går det sönder beror det oftast på något mänskligt fel som en felmontering eller så har växlingen mellan värme och kyla slitit sönder kretsarna. Fuktar klarar man rätt så bra om det inte blir så mycket att det leder till kortslutning. Om man köper chip från hyllan får man bädda för att de ska klara ställda krav. Man kan kyla eller värma chippet. Saab lovar ju kunden att grejerna ska hålla.

antennriktningen, elektriskt. Avståndet mellan två antennlement är oftast en halv våglängd vilket innebär en stor integrationsutmaning när man kommer upp i frekvens. Det är helt enkelt väldigt mycket elektronik som ska få plats på en väldigt liten yta. Det leder i sin tur till att det behövs bättre halvledare, kapsling och kylning. När elektroniken krymper alstras mer värme. Vätska är fortfarande gångbart för att kyla. Gripen har till exempel vätskekyllning av vissa system. Utvecklingen går mot att bygga kretsar ungefär som lego – så kallade chiplet – där man stoppar in många små chip med olika funktion och byggda i olika teknologier i en och samma kapsel.

Och "framtidensämnet" grafen?

– Tja, grafen har många bra egenskaper och har absolut sin plats inom vissa teknikområden men som halvledarmaterial för elektronik är jag inte övertygad. □

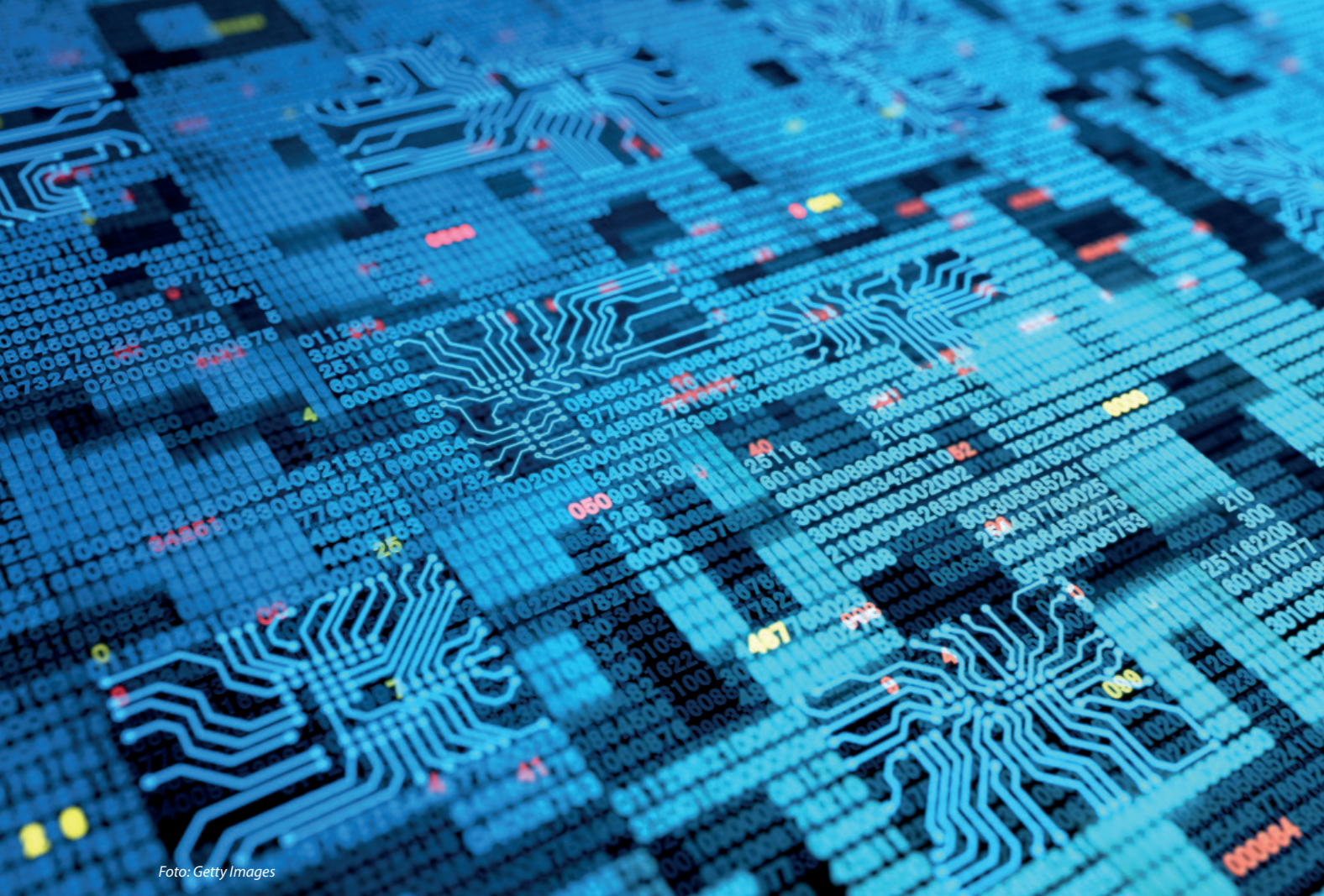


Foto: Getty Images

TRENDERNA SOM STYR UTVECKLINGEN

Nya material, strömsnålare och bättre processorer, effektivare minnen och nya arkitekturer för att utveckla halvledartekniken. Det är några trender som det amerikanska analysföretaget Gartner tror kommer att vara styrande.

Mikael Schönström, fil.dr. FMV

Det amerikanska analysföretaget Gartner följer flera framväxande teknologier, och halvledarteknik är inget undantag. Baserat på rapporter och några intervjuer med analytiker från Gartner kan utvecklingen inom halvledarområdet sammanfattas i ett antal punkter:

- Molnleverantörerna som driver stora datacenter strävar efter kraftigare processorer men som förbrukar mindre energi, med sänkta driftkostnader som mål.
- Tillverkare av IoT-utrustning, sakernas intranet, vill erbjuda mer affärsvärde genom att ge sina system bättre sensorer och mer analysförmåga. Formfaktorer som storlek och energibudget innebär stort behov av strömsnålare processorer. Beräkningarna måste göras direkt i enheten utan att behöva skicka all data vidare ut i nätverket.
- Fordonsindustrin utvecklar autonomare bilar vilka kräver mer processorkraft för att analysera de stora datamängder som genereras av bilens sensorer. Komponenterna måste också bli energieffektivare då framtiden är elektrisk och man vill maximera batterianvändningen. Prestanda per watt blir då kritisk.
- Komponenter som används i elbilens batterier och drivlinor måste klara högre spänning, upp mot 800 V, vilket driver utvecklingen kring kiselkarbid.
- Behovet av tåligare elektronik inom kraftelektroniken gör att industrin undersöker nya material med än högre bandgap som galliumoxid, Ga₂O₃ som klarar spänningar på upp till 8000 V. GaO-transistorer bedöms minska vikt och storlek men öka effektiviteten i elektriska drivlinor, kraftomvandlingsmoduler och växelriktare som används i förnybara energisystem.
- Galliumnitrid, GaN på kiselsubstrat är en teknik som intresserar många då

man kan kombinera stordriftsfördelarna från kiselsindustrin med de positiva egenskaperna hos GaN. GaN kan användas i applikationer med en spänning upp till 650 V.

- Behovet av snabbare och energisnålare processorer pressar miniaturiseringen av transistorer vilket gjort att FinFET-arkitekturen nått sina fysiska begränsningar. Nya transistorarkitekturer som GAA (gate-all-around) är på väg ut till marknaden inom något år.
- Heterogen integration och chiplets möjliggör att fler funktioner kan integreras på liten yta. Det innebär att kostnad i relation till prestanda fortsatt kan hållas nere.
- AI-trenden innebär att helt nya arkitekturer för AI-chip (ofta ASICs) och neuromorfisk hårdvara utvecklas.
- Fler sensorer och mer data innebär ökat behov av effektivare minnen som också är halvledarteknik. Nya typer av minnesarkitekturer utvecklas.
- Utvecklingen inom 5G och 6G driver intresset för chip som kan göra framtidens basstationer och antenner effektivare och strömsnålare.

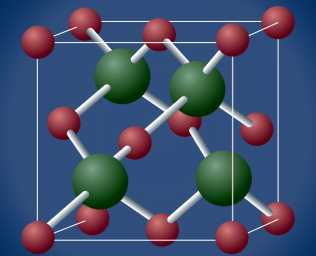
Beräkning i nätverket

Elektrifieringen av fordonsflottan sker snabbt. Vilken nivå av autonomi framtidens fordon kommer att nå under en tioårsperiod är svårt att sja om men nödvändiga tekniker inom databehandling och kommunikation går fram i snabb takt. Beräkningskraften flyttas ut i nätverket – i så kallade edgeenheter – det är inte bara datacenter, mobiler och bilar som behöver mer processorcapacitet. Mindre enheter och sensorer får AI-chip och blir "intelligenta" och kan kommunicera med andra enheter på ett helt nytt sätt.

När storleken på en transistor går ned mot 5 nm och därunder så bedömer Gartner att kostnaderna för denna >

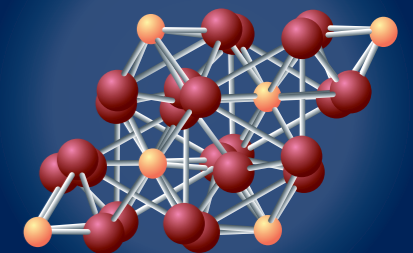
Borarsenid (BAs)

Även om kisel lätt låter negativa laddningsbärare susa genom sin kristallstruktur är materialet mindre tillmötesgående för "hål" – de positiva laddningsbärarna. Kisel är dessutom inte särskilt bra på att leda värme. Ett team av forskare vid bland annat MIT och University of Houston har genomfört experiment som visar att ett nytt material – kubisk borarsenid – ger hög rörlighet till både elektroner och hål, det har dessutom tio gånger bättre värmeledningsförmåga än kisel. Materialet är ännu bara på lab-stadiet och utmaningen är att kunna producera stora kvantiteter med samma höga renhetsgrad som kisel. Lyckas man kan borarsenid vara en kandidat till framtidens nya arbetshäst i halvledarvärlden.



Galliumoxid (Ga₂O₃)

Ett annat lovande halvledarmaterial med ett extremt bandgap på 4,8 till 4,9 eV är galliumoxid, vilket är mer än fyra gånger bandgapet för kisel. Ga₂O₃ har utmärkta fysikaliska egenskaper men har också låg rörlighet och värmeledningsförmåga vilket kräver fortsatt utveckling innan det kan bli kommersiellt intressant.



»En självkörande bil kan skapa 5 TB data på bara en dag.«

miniatyrisering blir så hög att förhållandet mellan storlek och kostnad inte fortsätter på samma sätt som tidigare. Relationen mellan transistorstorlek och pris/prestanda planar ut och kanske till och med ökar framöver. Kostnaden stiger inte bara för att den komplicerade utrustningen är dyr och tillverkningsprocessen svår utan också för att avkastningen på tillverkningen (den så kallade yelden) kanske minskar till hälften. Inga chip är helt felfria men om avkastningen bara blir hälften av den totala produktionen så går naturligtvis priset upp på chip med högst kvalitet.

Heterogen integration och chipleths

Gartner bedömer att heterogen integration är en teknik som växer kraftigt när industrin vill utveckla kraftfullare chip och när den avancerade miniatyriseringen mot 2 nm driver chipprisererna uppåt. Framöver kommer industrin inte att designa chip som innehåller alla nödvändiga funktioner på ett och samma chip. Heterogen integration innebär att olika funktioner som minne, processor, I/O-kontroller placeras i olika chipleths som sedan integreras till en helhet. Detta kommer att öka flexibiliteten och skapa nya möjligheter för chipindustrin.

Design och tillverkning av chip som består av ett antal chipleths ställer industrin inför nya utmaningar som standardisering av interface och protokoll för integrering av olika chipleths. För att lösa detta är initiativ på väg som till exempel universal chilet interconnect express, UCle som kommer att underlätta framtida integration av chipleths från olika leverantörer.

Compute express link är en annan typ av standard som kommer att användas av UCle för förbättrad minneshantering och kommunikation mellan olika chipleths.

När chipleths integreras både bredvid varandra och ovanpå varandra, 3D-integration, så ökar det komplexiteten i tillverkningen. Provnings och verifiering blir också svårare då det helt enkelt är svårt att visuellt upptäcka defekter när flera chipleths täcker varandra. Den här utvecklingen innebär att nya mät- och verifieringsmetoder utvecklas. Flera företag som till exempel Intel och AMD har börjat använda 3D-integration för sina nya chip. Runt 2030 kommer 90 procent av alla integrerade kretsar att använda någon form av heterogen integration, bedömer Gartner. Heterogen integ-

ration och nya standarder som UCle möjliggör för optiska tekniker. Optisk kommunikation mellan chipleths och chip kommer att öka hastigheten i dataöverföringen, och sänka energiförbrukningen.

Gaurav Gupta, analytiker på Gartner, tar en vanlig mobiltelefon som exempel. En modern mobiltelefon har många avancerade chip för att styra till exempel kamera, telefoni och strömförsörjning. Kan man packa ihop alla dessa chip på ett kompakt sätt kan mobilens formfaktor minskas samtidigt som kostnaden. Om minne och logik kan placeras nära varandra innebär det också bättre prestanda. Det har varit en begränsande faktor att data från minnet måste transporteras fram och tillbaka från minnet till processorn, enligt den

Demokratisk chipdesign

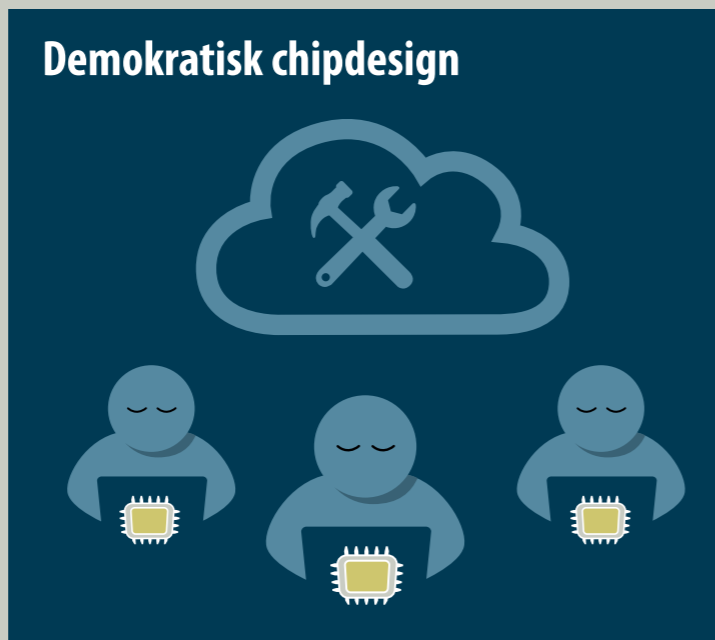


Foto: Getty Images

klassiska von Neumann-arkitekturen.

Det är inte bara mer processor kraft som är viktigt i framtiden utan även minnen och lagringskapacitet. Det är mycket data som genereras av sensorerna i till exempel en autonom bil. Vissa beräkningar gör gällande att upp till 4TB data per dag kan sensorerna generera och denna datamängd ska delvis lagras och göras snabbt tillgänglig för processorerna som ska räkna ut hur fordonet ska uppföra sig. Gartner ger exempel på några kommande minnestekniker som bedöms vara intressanta.

- Phase change memory, PCM är ett icke-flyktigt minne som använder egenskaperna i materialet germanium-antimon-tellur (GeSbTe). PCM anses ha bra egenskaper för så kallad in memory computing och neuro-morfisk databehandling. PCM har lång lagringstid, upp till cirka tio år utan behov av någon spänning samtidigt som det går
- Spin transfer torque magnetic random access memory, STT-MRAM är en magnetisk minnesteknik som utnyttjar MRAM vilket innebär att data lagras med hjälp av magnetiska tillstånd istället för de elektriska laddningarna som används i till exempel dynamic random access memory, DRAM. STT-MRAM kan lagra större mängder data, möjliggöra snabbare dataåtkomst och förbrukar mindre energi än befintliga elektroniska minnen.
- Resistive random access memory, ReRAM är ett icke-flyktigt minne med utmärkta egenskaper som låg strömförbrukning och som går snabbt att skriva till. Detta minne anses lämpligt för små bärbara enheter. Tekniken bedöms i framtiden ersätta så kallade flash-minnen. Det pågår forskning för att hitta lämpliga material för

väldigt snabbt att skriva och läsa till minnet.

denna minnesteknik, till exempel görs försök med hafniumdioxid (HfO₂).

Designa ditt eget chip

Trenden kring chipleths förutsätter gemensamma utvecklingsmiljöer där företagen som designar olika chipleths kan samverka för att öka interoperabiliteten mellan chipleths. Målet är att underlätta integration av chipleths till en fungerande helhet.

En viktig trend att lyfta fram i detta sammanhang är att molnleverantörer som Amazon och Microsoft tillsammans med ledande halvledartillverkare och EDA (Electronic Design Automation) leverantörer börjar erbjuda molnbaserade tjänster för chipdesign. Gaurav Gupta nämner att hela ekosystemen för chipdesign blir tillgängliga i molnet. TSMC har flyttat ut sitt chip-ekosystem i molnet. TSMC:s initiativ heter open innovation platform. Liknande initiativ har Intel och Samsung. Den här trenden möjliggör för fler aktörer att designa systemspecifika chip. Den ökade tillgängligheten till ▶

designverktyg och mallar underlättar för mindre startups att designa nya typer av chip.

Det utvecklas också ett nytt ekosystem av fabless (företag som designar chip men inte har någon egen tillverkning) och EDA-leverantörer i Kina enligt Gartner. Närvaron av de stora molnleverantörerna på den kinesiska marknaden innebär att tillgången till infrastruktur för avancerad chipdesign även kommer Kina till godo. Detta innebär ett uppsving för mindre kinesiska startups som kan designa chip utan att behöva passera den höga tröskel som det innebär att bygga upp en utvecklingsmiljö för chip med servrar och mjukvaror.

Tesla designar en del egna chip och Gaurav Gupta berättar att även General Motors har börjat designa egna



Foto: Getty Images

»Bolag inom många områden har börjat att utveckla sina egna chip.«

chip för sina kommande självkörande bilar. Nu handlar det bara om två eller tre speciella AI-chip som GM designar för att behandla all data från bilens sensorer. Övriga chip som behövs kommer fortsatt att köpas från standardleverantörer. Bolag inom många områden har börjat utveckla egna chip för att kontrollera sin produktutveckling och sina leveranskedjor. Detta är något som försvarsindustrin naturligtvis utnyttjar. Darpa har flera olika chip-program och FPGA används ofta för att utveckla specifika chip för försvarsapplikationer.

Demokratiseringen av chipdesign innebär fördelar då företagen får det lättare att designa egna chip som passar deras specifika behov. Standardchip är trots allt chip som inte alltid är optimerade för de funktioner som företaget vill ha i sin produkt. Särskilt inom AI så är detta relevant. AI-funk-

tioner implementeras ofta i särskilt utvecklade ASICs, berättar Gaurav Gupta. Han förklarar att miniaturiseringen av transistorer ned mot 2–3 mm gör att marknaden är på väg bort från FinFET-strukturen. Vid en storlek på 2–3nm ger GAA en mycket bättre prestanda. Intel, Samsung och TSMC är på väg att utveckla chip med denna avancerad produktionsutrustning och de stora chiptillverkarna samarbetar tätt med det nederländska halvledarföretaget ASML för att utveckla den nya produktionsutrustningen.

AI och halvledare

Alan Priestley på Gartner följer bland annat utvecklingen inom AI-chip och inbyggd AI. AI-marknaden utvecklas men rör sig något långsamt, säger han. GPU-tekniken är dominerande inom datacenters för AI-beräkningar. GPU:n

har länge varit den dominerande processorteknologin för att exekvera så kallade deep neural networks (DNN). I den så kallade edge-miljön börjar det dock bli vanligare med särskilt utvecklade AI-chip. Efter GPU:n räknar Gartner med att speciellt utvecklade AI-chip kommer att ta över. Alan Priestley förklarar att företagen tränar och komprimerar de stora AI-nätverken genom sina mjukvaror. Det komprimerade och tränade AI-nätverket förs över till det specialiserade AI-chippet som placeras i en edge-enhet.

AI-chippen utvecklas till stor del av nystartade företag. GPU-marknaden är mer koncentrerad runt ett fåtal etablerade företag. När det kommer till det som kallas end point analytics är det många nya företag och det finns ingen gemensam arkitektur som i GPU-världen. Alla företag har sin arkitektur som de utvecklar. Den gemensamma

»Man försöker att lära sig att snåla på energi lika bra som hjärnan.«

nämnamnaren är i stället mjukvarulagret som ofta utgår från olika ramverk baserat på öppen källkod. Vissa företag är specialiserade på att utveckla chip för kameraindustrin, andra företag är specialiserade på att utveckla chip för textanalys. Analysen görs direkt i enheten, som till exempel i en kamera och sedan skickas bara metadata vidare till nätverket. Vissa företag använder FPGA eller standardiserade mikrokontroller med hjälp av maskininlärningsramverket TinyML. Det är ett stort spektrum av aktörer som är specialiserade mot olika edge-plattformar. Det är en fragmenterad marknad. Leverantörslandskapet består av cirka 80 olika företag som ofta är helt nya med varierande grad av mognad och kapital och som specialiserat sig kring en viss teknik. Efterfrågan på marknaden växer dock för olika AI-tillämpningar och Gartner bedömer att marknaden

för AI-chip kommer att värderas till cirka 86 miljarder dollar 2026.

Användandet av AI inom flera områden driver på utvecklingen av processorer som är särskilt lämpade för AI-beräkningar. Runt år 2030 bedömer Gartner att så kallad neuromorfisk databehandling blir vanligare inom AI. Ett problem är att stora AI-nätverk som bygger på deep neural networks (DNN) förbrukar mycket energi. Man försöker hitta en design som efterliknar vår hjärna för att få ned strömförbrukningen. Den mänskliga hjärnan är väldigt effektiv på att analysera information. Energiåtgången är bara cirka 20 watt trots cirka 100 miljarder neuroner och tusen biljoner synapser. Inom AI så anses spiking neural networks, SNN efterlikna hjärnans sätt att arbeta. Det pågår en hel del forskningsprojekt med att utveckla specifika neuromorfiska chip som ska

kunna exekvera SNN. Fördelen med neuromorfiska chip är att de dels förbrukar mycket mindre energi än dagens GPU:er och dels kräver mycket mindre träningsdata och kan tränas under tiden när de används. Det är riktigt intressant för mindre enheter eftersom strömförbrukningen är extremt låg, kanske bara några milliwatt. Men de skulle naturligtvis även fungera i ett datacenter. Det är en viktig utveckling anser Alan Priestley. Men det krävs ett nytt programmeringsparadigm och nya chip då de till stor del är av analog natur istället för digital.

Neuromorfiska chip bedöms särskilt lämpade för att analysera händelsebaserade dataströmmar. Datat processas i eller nära minnet vilket gör att lite energi konsumeras och dessa chip är snabbare än traditionella chip. Traditionell bildbehandling analyserar ett antal bilder i en sekvens, medan till exempel en så kallad händelsebaserad kamera analyserar endast förändringar i enstaka pixlar i en dataström. Gartner bedömer att typiska användningsområden för neuromorfisk databehandling är inom analys av bilder, video och text. Det är intressant för applikationer i drönare, robotar, och autonoma fordon.

I en rapport lyfter Gartner fram några bolag inom neuromorfisk databehandling där de kändaste är Intel (som utvecklat ett neuromorfiskt chip, Loihi) och australiska företaget Brain Chip samt schweiziska SynSense och nederländska Innatera. □



Neuromorfiska chip

Neuromorfiska chip syftar till att skapa ett system som kan imitera hjärnans beteende, och följaktligen ge hög datorprestanda till mycket låg energiförbrukning.

SVERIGES SÄKERHET BLIR MER BEROENDE AV HALVLEDARTEKNIK



Foto: Getty Images

Sverige ligger långt framme inom halvledarforskning och design av chip, men det saknas en större tillverkning av halvledare i landet. Sverige har goda förutsättningar att tillsammans med andra länder driva halvledartechniken framåt och konstruera avancerade vapensystem. Svensk nationell säkerhet kommer att bli ännu mer beroende av ledande halvledartechnik. Västvärlden har ett försprång vad gäller högteknologi, men för att behålla det försprånget måste våra innovationssystem snurra snabbare än motståndarens.

Mikael Schönström, fil.dr. FMV

Utvecklingen inom halvledartechnik drivs av elektrifieringen av samhället, behovet av att analysera den växande mängden data och behovet av att kommunicera mer data (5G/6G). Det är förenklat några starka drivkrafter som identifierats under arbetet med den tekniska prognosen.

Behovet av halvledartechnik i framtiden kommer att öka kraftigt. Omställningen av samhället mot förnyelsebara energislager och elektrifieringen av våra fordon skapar en stor efterfrågan på halvledarkomponenter för kraftelektronik. Fortsatt digitalisering och utveckling av autonoma system innebär ett enormt behov av halvledarkomponenter för nya sensorer, databehandling och trådlös kommunikation.

Idag toppar ofta bilar och fossila bränslen listorna över de mest handlade produkterna i världen. Halvledare och elektronik ligger än så länge under de kategorierna, men med tanke på nuvarande trender och drivkrafter kring autonomi, elektrifiering, digitalisering och virtualisering så kommer behovet av halvledarkomponenter med all sannolikhet öka och gå om de andra varuslagen. Halvledarkomponenter är det nya guldet. I den digitaliserade ekonomin är data och information den nya oljan som smörjer informations-

samhället. Grunden till välstånd och nationell säkerhet.

Det är en utmaning att analysera ett så stort teknikområde som halvledartechnik. Men ett försök till analys utgår ifrån ett antal faktorer vilka bedöms påverka den framtida utvecklingen: teknikmognad, tillgång till tillverkningsresurser, tillgång till kompetens och finansiering.

Teknikmognad

Halvledartechnik är inte en enskild teknik utan halvledarkomponenter uppträder i många olika skepnader. Det är ett strategiskt område vilket gör att det pågår mycket forskning och utveckling runt om i världen. Området växer i alla riktningar och halvledarna får en framskjuten roll i allt fler tillämpningar.

Det pågår mycket forskning kring olika halvledande material. Kisel är det mest förekommande och väletablerade. Galliumnitrid, GaN och kiselkarbid, SiC används redan i olika tillämpningar men mycket utveckling sker fortfarande kring effektivisering och förbättring av tillverkningsprocesser, nya typer av komponenter och tillämpningar. Nyare material som galliumoxid, grafen (till exempel kolnanorör) och borarsenid är

»Bristen på halvledare har skapat en våg av planer för nya fabriker över hela världen.«

fortfarande på forskningsstadiet.

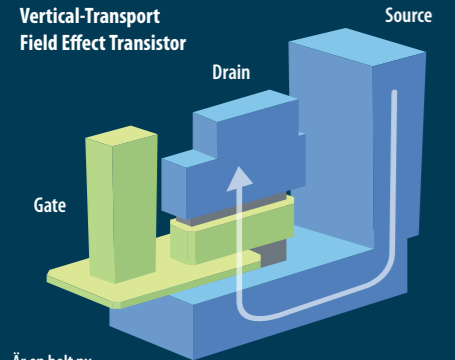
Nya typer av transistordesigner som gate-all-around, GAA är under utveckling och Gartner bedömer att Samsung är först ut tätt följt av Intel och TSMC under kommande år. GAA ska möjliggöra en transistorstorlek på 2 nm och under det. IBM forskar på nya transistor-arkitekturer som vertical-transport nanosheet field effect transistor, VTFET, som bedöms möjliggöra än lägre energiförbrukning. Transistorer i 2D-material bedömer Gartner kan närma sig kommersialisering runt 2030. Det kommer att innebära nya möjligheter till 3D-integration och lägre energiförbrukning. Massachusetts Institute of Technology, MIT visade 2020 att man kan producera kolnanotransistorer i industriell skala på 200 mm wafers.

Någon övergripande nivå på teknikkens mognad går inte att ange utan vissa teknikområden inom halvledartechnik är helt enkelt mognare än andra.

Tillverkningsresurser

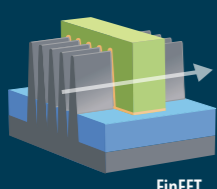
I samtal med personer vi mött under arbetets gång så omnämns ofta att den sista större chipproduktionen vi hade i Sverige var Ericssonfabriken i Kista. Nu när den är nedlagd sedan länge så finns det egentligen ingen chipproduktion att tala om längre i Sverige. MyFab har viss produktionskapacitet för forskningsändamål och produktutveckling, där företag kan producera specifika komponenter i mindre serier.

Halvledarbristen har gjort att många nya fabriker planeras framöver. Mellan 2022 och 2027 planeras 78 nya halvledarfabriker att byggas. 64 kommer att placeras i Asien, 14 i USA och nio i Europa, Mellanöstern och Afrika, och tio i Japan enligt Gartner. Det pågår en global kamp om att locka till sig nya fabriker. USA erbjuder statsstöd och flera stora utländska tillverkare har börjat bygga fabriker i USA. ▷

VTFETVertical-Transport
Field Effect Transistor

Är en helt ny transistordesign där strömmen mellan source och drain inte färdas horisontellt från vänster till höger som på traditionella design som FinFET, utan istället från botten till toppen. Detta eliminerar ett stort problem med dagens tätt packade transistorer som stör varandra med läckströmmar.

Att transistorerna byggs på höjden och inte horisontellt gör också att source och drain kan byggas större vilket gör att strömflödet kan ökas. Med en längre gate kan man mer effektivt utesluta oönskat läckage eftersom grinden har mer kontroll över elektronernas flöde.



FinFET

Tillsammans kan detta radikalt förbättra transistorens switch-hastighet samt minska strömförbrukningen.

Men statsstödet kommer med en hake – företag som investerar i och får statsstöd från USA får inte investera i modern teknik i sina kinesiska fabriker. USA:s omfattande satsningar gör att Sydkorea oroar sig för att Samsung och SK Hynix, som är världsledande på minneschip, lägger sin kraft på att bygga nya fabriker i USA istället för i Sydkorea.

Tillgång till kompetens

Våra besök på högskolor som KTH, Chalmers och Lund ger en bild av att svensk forskning ligger i framkant. En långsiktig utmaning är dock svenska ungdomars bristande intresse för naturvetenskaper varför doktorander och forskare ofta rekryteras från utländska universitet. Det är ingen ovanlighet i den akademiska världen som kännetecknas av frekventa internationella samarbeten. Men eftersom det inte finns någon större produktion eller ekosystem kring halvledare försvinner ofta spetskompetensen tillbaka till utlandet lockad av högre löner och utveck-

lingsmöjligheter. Hur kommer detta att långsiktigt påverka tillgången till halvledarkompetens inom den svenska försvarsforskningen?

Finansiering

Det är dyrt att bygga de mest avancerade chipfabrikerna. 100 miljarder dollar planerar TSMC att investera i ny produktionskapacitet de kommande tre åren. Halvledare är globalt sett ett strategiskt område, så det satsas rejält. De mest omtalade initiativen är CHIPS and Science Act och European Chips Act. CHIPS and Science Act innebär att den amerikanska staten satsar 52,7 miljarder dollar på att stödja uppbyggandet av en inhemsk produktion i USA för olika typer av halvledare. European Chips Act innebär att EU satsar 43 miljarder euro till 2030 för att stödja halvledarproduktion i Europa. Korea och Japan har planer på att göra motsvarande statsstödda satsningar för att upprätthålla en inhemsk kompetens kring design och produktion till sina industrier.

Det finns även större nationella satsningar som är värda att notera. Spanien planerar att satsa 12 miljarder euro på att bygga ett ekosystem för halvledarteknik i Spanien. Italien har aviserat liknande planer och satsar 4,4 miljarder euro. Enligt nyhetsuppgifter är Intel på väg att investera 5 miljarder euro i en ny fabrik i Italien. På årets elektronikmessa i Kista 15–16 juni, uttrycktes viss besvikelse av branschrepresentanter att Sverige satsar alldeles för lite på detta strategiska område jämfört med andra europeiska länder.

Det är förstås en sak att basunera ut planer om potentiella framtida investeringar och en helt annan att realisera planerna. Det kommer att krävas ett fast och långsiktigt ledarskap för att faktiskt nå hela vägen fram till färdig fabrik. När produktionen sedan väl är igång måste den uppvisa lönsamhet. Teknikutvecklingen går snabbt framåt och en fabrik kan snabbt bli obsolet, om man inte hänger med.

Den framtida utvecklingen sammanfattad i ett antal punkter

- Kisel kommer att vara det dominerande materialet för halvledare

i framtiden även om andra material kommer att användas för vissa typer av tillämpningar. Beroendet av kisel-foundries i Asien kommer således att bestå intill dess att nya fabriker kommit igång i USA och Europa.

- Behovet av att behandla och analysera mer data at the edge driver nya arkitekturer för chip. ASICS är det dominerande inom AI-chip med en förväntan att neuromorfiska chiparkitekturer blir mer dominerande bortom 2030.
- Miniaturiseringen driver kiselindustrin mot nya former av transistordesign som GAA vilket kommer att skapa än snabbare och energisnålare chip, men även driva upp priserna jämfört med idag på de mest avancerade chippen. Transistorer i 2 nm storlek med GAA design bedöms bli verklighet runt 2025.
- Transistorer i 2D-material ökar möjligheten för 3D-integration, än lägre energiförbrukning och böjbara chip. De bedöms bli kommersiellt tillgängliga tidigast 2030
- Elektrifieringen inom mobilitet driver utvecklingen inom kraftelektronik mot nya material som kiselkarbid, galliumnitrid och galliumoxid. Transistorer i galliumoxid bedöms kommersiellt tillgängliga tidigast 2030
- Heterogen integration och chiplets skapar nya ekosystem inom chipdesign, och nya möjligheter till att bygga chip med unika egenskaper. Utvecklingen av heterogen integration är pågående och beror i sin tur på utveckling och acceptans inom industrin för olika standarder som UCLE.
- Optiska tekniker för att snabba upp kommunikation mellan chiplets och komponenter kommer att bli vanligare framöver

- Demokratisering av chipdesign via molnet innebär förenklad tillgång till utvecklingsverktyg vilket möjliggör att fler kan designa chip för specifika funktioner och tillämpningar

Avslutande reflektioner

Vi har god kompetens på våra högskolor och det skapas nya företag inom vissa nischer. Sverige ligger långt fram inom halvledarforskning och design av chip. Det som saknas för att vi ska bli ännu bättre är en större tillverkning av halvledare i Sverige. Halvledarproduktion i större skala skulle innebära ett starkare ekosystem kring halvledarteknik. Vi har bra geografiska förutsättningar med mycket mark, stabil berggrund och tillgång till vatten. Detta lyftes upp av representanter från elektronikbranschen på årets elektronikmessa i Kista. Uppfattningen är att det är rimligt att etablera halvledartillverkning i Sverige. Inte för de mest avancerade chippen, de som till exempel används i en iPhone, men det finns stort behov av halvledarkomponenter som inte kräver den mest avancerade precisionen, inom fordonsindustrin, kraftindustrin och inte minst försvarsindustrin. Sverige har idag internationellt sett goda förutsättningar för att tillsammans med andra partners i den fria världen driva halvledartekni-

ken framåt, och konstruera avancerade vapensystem.

Utmaningen med halvledarkomponenterna idag är att leveranskedjorna är komplexa och själva komponenten är gömd långt ned i systemarkitekturen. Det blir svårt att ha kontroll över och säkerställa en långsiktig försörjningstrygghet när vi varken kontrollerar design, komponentintegration, produktion, eller leverans av delkomponenterna.

Hur skapar vi försörjningstrygghet kring framtidens AI-chip? Hur kommer reservdelarna till de autonoma systemen att lagerhållas? Den snabba it-utvecklingen innebär redan idag att etablerade underhållsprocesser utsätts för svåra utmaningar. Är det någon idé att lagerhålla grafikkort i fem år när hela systemet ändå är obsolet inom samma tidsrymd?

Vapensystemen kommer att bli smartare och kräva mer detaljerad information för effektiv användning. Smarta vapen som samverkar med varandra i större utsträckning kommer att bli vanligare. Svensk nationell säkerhet kommer att bli mer beroende av ledande halvledarteknik. Tillgång till information och avancerade vapen i en konflikt kan vara skillnaden mellan liv och död. Elektrifieringen innebär dock nya risker. Avancerad elektronik är

sårbar. Tillgång till kraftförsörjning blir kritisk och elektromagnetiska vapen ett växande hot.

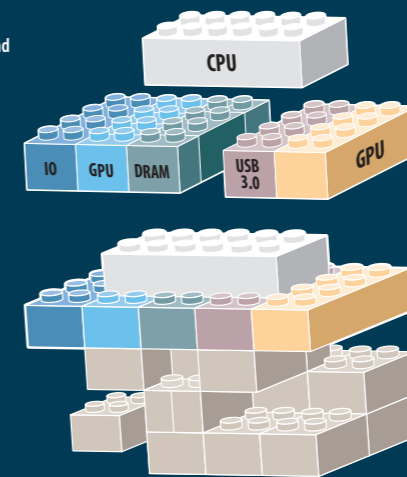
Tröskeln för att designa avancerade chip sänks och tekniker kring heterogen integration fortsätter att utvecklas. Demokratisering av chipdesign genom ökad tillgång till designverktyg via molnbaserade tjänster kommer sannolikt att försvåra icke-spridningen av avancerade chip till vapenkonstruktörer i icke-demokratiska länder.

Att Kina planerar att på ett eller annat sätt integrera Taiwan med fastlandet 2027 eller tidigare är inte en främmande tanke utan något som väst måste planera för. Om Taiwans produktionskapacitet och kunskap tillfaller Kina, kommer säkerligen de resurserna att även etableras och kanske delvis flyttas till fastlandet. USA och väst har hittills varit ledande på design av avancerade integrerade kretsar vilket inneburit tillgång till avancerade vapen och ett informationsövertag. Det är inte säkert att vi kan behålla samma försprång under det kommande decenniet.

För att fortsätta att behålla försprånget måste våra innovationssystem hel enkelt snurra snabbare än motståndarens. □

3D-chiplets

En chiplet är en liten integrerad krets (IC) som innehåller en väldefinierad delmängd av funktionalitet. Den är designad för att kombineras med andra chiplets på ett eller flera mellanlägg i en enda förpackning.



En uppsättning chiplets kan byggas ihop likt LEGO-bitar i 3D. Detta ger flera fördelar jämfört med ett traditionellt system på chip (SoC).

»Är det någon idé att lagra grafikkort i fem år när hela systemet blir omodernt på samma tid?»

BRA IDÉER GER NYA PENGAR

Att gå från akademien och forskning till ett blomstrande företag är ingen enkel resa. Men en del lyckas som Smoltek i Göteborg. Det är inte så svårt numera att få pengar. Det gäller att ha bra idéer som det går att göra pengar på. Det säger Farzan Ghavanini som började på Smoltek i april efter att ha arbetat vid det svenska teknologiföretaget Fingerprint Cards i sju år.



Där tog Farzan Ghavanini in ny teknik och utvecklade företagets teknologiportfölj. På Smoltek är han forskningschef och ska hitta tillämpningar för företagets kärnteknologier. Den främsta är kolnanorör. Farzan Ghavanini har doktorerat i mikroteknologi och nanovetenskap vid Chalmers.

Supertunn kondensator

Företaget grundades 2005. För några år sedan började det expandera mot en mer affärsorienterad inriktning med ett fokus på att föra ut teknologin på marknaden

Dotterföretaget Smoltek Innovation gör cellmaterial för elektrolyter och dotterföretaget Smoltek Semi gör kondensatorer för halvledarindustrin.

En kondensator är en passiv elektronisk komponent som kan lagra laddning.

– Vår kondensator är mindre än diametern av ett hårstrå, säger Farzan Ghavanini.

Kondensatorer görs för mobila

»Vi har ett verktyg som förvandlar en kvadratmillimeter kisel till en hundratusen gånger större yta. Det kan utnyttjas på flera sätt«

tillämpningar som till exempel telefoner. Det blir fler och fler transistorer. Processorerna blir känsligare för störningar i strömmen. För att kunna placera kondensatorn så nära processorn som möjligt måste kondensatorn vara supertunn. Och den måste ha hög kapacitet.

– Väte blir allt vanligare som energikälla. Vi kan bygga en effektivare elektrolyscell därför att kolnanorörens yta är så stor jämfört med volym och vikt, säger Farzan Ghavanini.

För att göra kolnanorör måste man ha särskild utrustning, särskilda processer och särskilda material. Smoltek bygger nya tillväxtkammare med ett amerikanskt företag.

– Vi har ett verktyg som förvandlar en kvadratmillimeter kisel till en hundratusen gånger större yta. Det kan utnyttjas på flera sätt. För kondensatorer – större yta ger större effekt. I förhållande till sin storlek finns inget starkare än kolnanorör.

Elektronikområdet kommer att fördubblas på några år. Var är Smoltek i detta?

– Vi gjorde fingerprintsensorer i stor volym, men det blev svårare att få leveranser från foundries (se grafik sid 94) därför att andra företag styr in sig på denna marknad. Det blir även ett ökat tryck på kapslingsföretagen. Chippen blir mer komplicerade. Man bygger inte längre bara på ytan utan utnyttjar volymen. Med 3D-kondensatorer blir det ett helt system i en liten enhet.

– Europa har insett att man måste ha egen tillverkning av skivor. Det är svårt att finna dessa resurser i Sverige. Vi måste vända oss till Sydostasien och nu även Indien.

Som möjliga nya affärsområden

nämner Smoltek energilagring och medicinteknik.

Det går sakta i Sverige

Farzan Ghavanini kom till Sverige för att doktorera vid Chalmers.

Han håller med om att det är svårt att få svenska ungdomar att bli teknikutövare.

– Det skulle jag kunna tala om i tre timmar. Antalet svenska studenter inom elektronik har minskat betydligt. Det är svårt för svenska företag att få svenskar. Det är en tuff marknad med hård konkurrens.

– När jag jobbade på Fingerprint hade vi samarbete med Kina och anställde kineser. En ung ingenjör kanske hade en fjärdedel av motsvarande lön i Europa. En erfaren ingenjör hade dock tre gånger den europeiska lönen. Utbildning och erfarenhet betalar sig mycket bättre i USA och Tyskland än i Sverige. Det går sakta i Sverige jämfört med USA och Asien. Men det finns också fördelar. Miljön är en. Det har blivit mycket lättare under de senare åren att få finansiering. Har man bara en bra idé så kommer pengarna.

Smoltek har vuxit fram ur forskningen vid Chalmers.

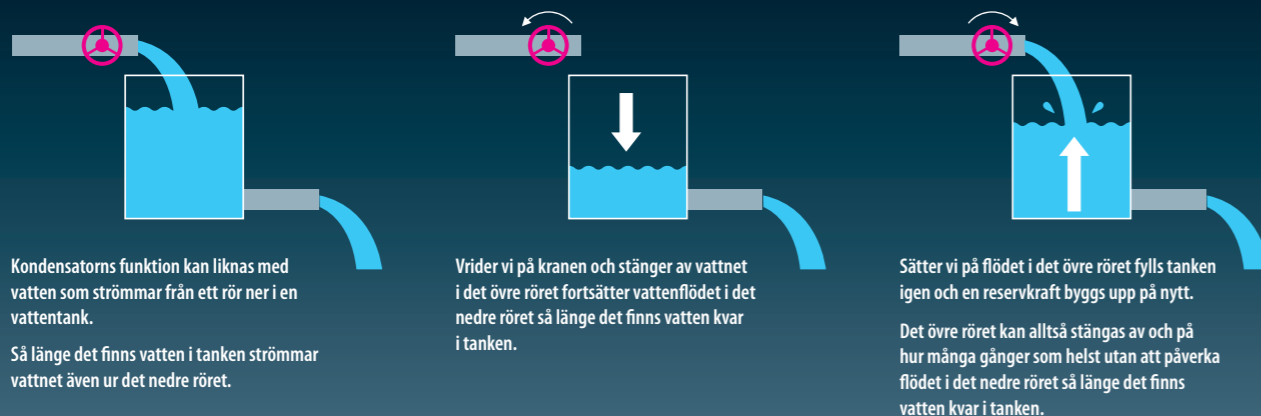
– Nu har forskningen på kolnanorör minskat där och man satsar mer på det coolare grafen. Grafen är bra på mycket, men inte riktigt bra på något. Det finns material som slår grafen på alla områden. Men det är cool forskning. Det är nanomaterial. Det är svårt att få ut ett värde av dessa material i stor skala. Det fanns stora förväntningar på grafen därför att elektronerna var så snabba. Men när man började bygga saker med grafen så tappade elektronerna farten. Det var i början lite av samma sak med kolnanorören. □

Supertunna kondensatorer

Smolteks process att odla kolnanorör används bland annat till att tillverka supertunna kondensatorer för att användas i processorer för mobiltelefoner. Det tillverkas cirka 1,5 miljarder processorer för mobiltelefoner årligen och varje chip är utrustat med 5–10 avkopplingskondensatorer.

Detta gör en kondensator

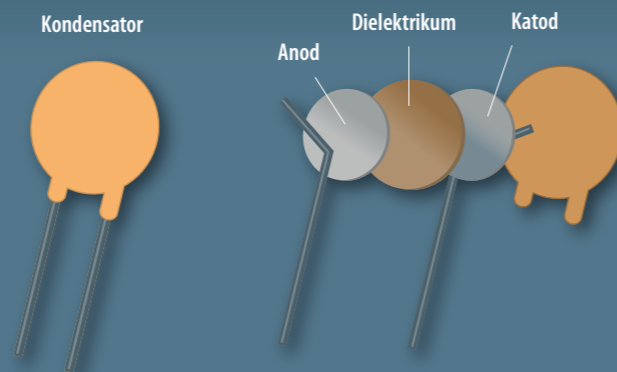
En kondensator är en passiv elektronisk komponent som kan lagra elektrisk laddning för att sedan kunna portionera ut densamma igen vid behov. Det är en användbar egenskap varför man hittar kondensatorer på så gott som alla kretskort.



Kondensators uppbyggnad

I elektroniska kretsar fungerar kondensatorn som vattentanken, den lagrar energi och kan frigöra kraft för att utjämna avbrott i strömflödet.

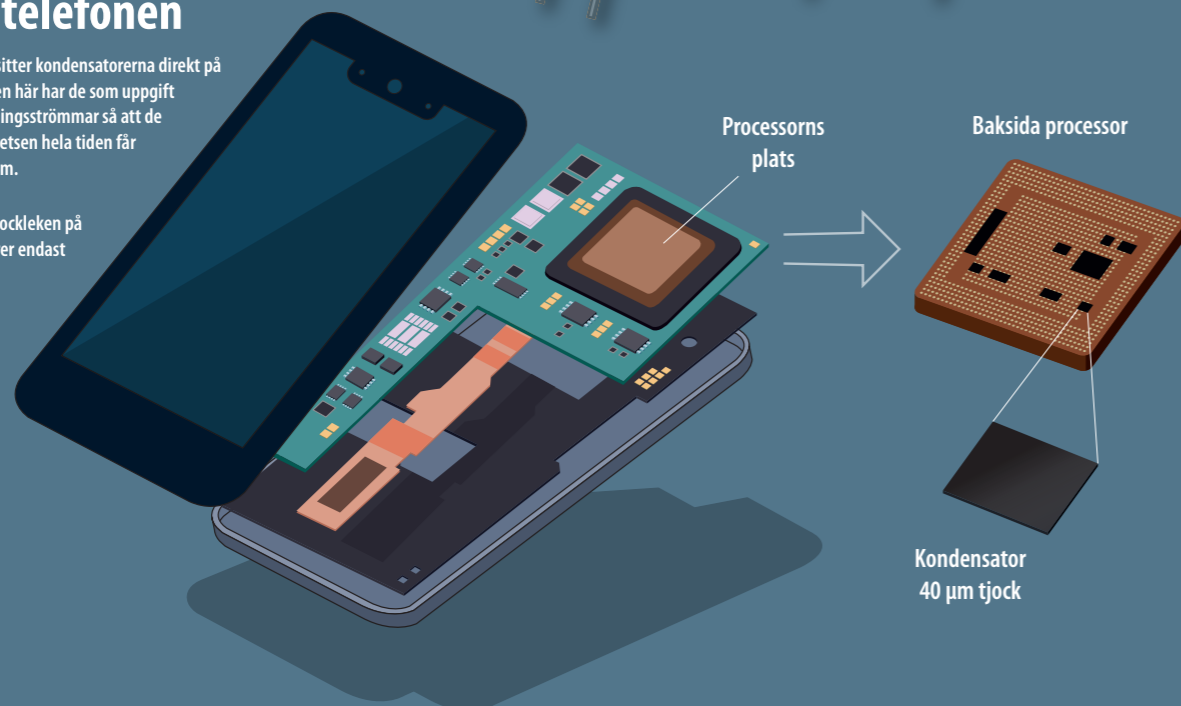
En vanlig kondensator – som du kan hitta på ett kretskort – består i princip av två elektriskt ledande ytor, kallade elektroder (anod och katod), och en däremellan elektrisk isolator, dielektrikum. Det är mellan de två åtskilda ledande ytorna spänningen byggs upp.



I mobiltelefonen

I en mobiltelefon sitter kondensatorerna direkt på processorn och även här har de som uppgift att utjämna spänningsströmmar så att de olika delarna av kretsen hela tiden får lagom mycket ström.

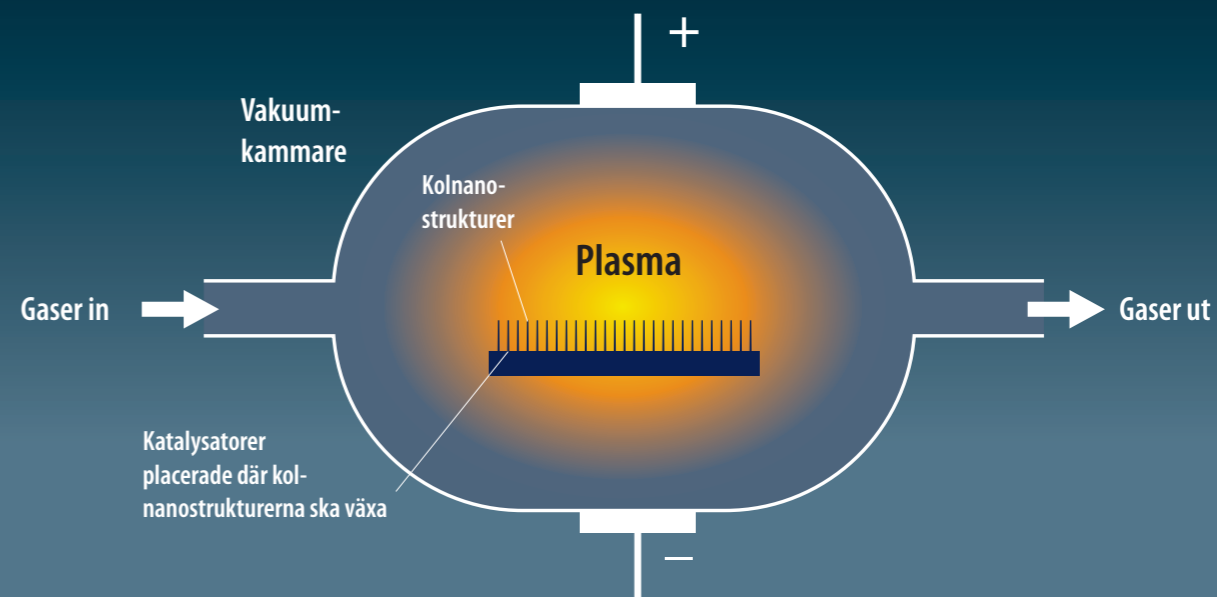
Skillnaden är att tjockleken på dessa kondensatorer endast är 40 mikrometer.



Den tekniska processen

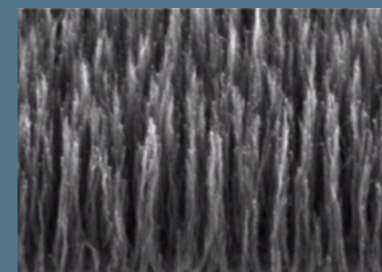
SmolGROW kallas metoden för att växa kolatomer i exakt definierade mönster och placering. Detta görs i en vakuumbakare med hjälp av gas och katalysatorer. Resultatet blir en skog av kolnanorör. Varje kolnanorör har en diameter på 5–500 nanometer och en längd mellan 1–200 mikrometer. En nanometer (1 nm) är en tusendels mikrometer (0,001 µm).

Kolnanofiber är ett supermaterial. Det är starkare, mer elastiskt och lättare än stål. Den leder värme och elektricitet bättre än metall.



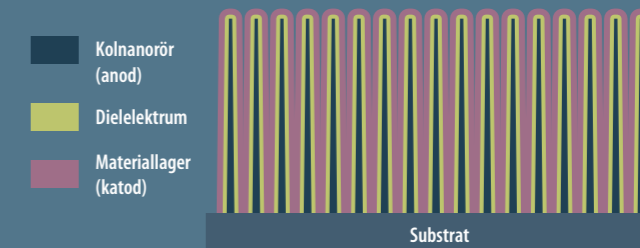
Hur kan en så liten kondensator vara så effektiv?

Ett kolnanorörs mantelyta är hundratal gånger större än den yta den upptar. Således skulle en skog av kolnanorör multiplicera ytan, men inte med så mycket som hundratal gånger, det måste finnas utrymme mellan dem för att tillåta åtkomst till kontaktytan.



Det första ledande materialet

När skogen av kolnanorören är färdigväxt så är den första elektroden till kondensatorn (den ledande anoden) redo för nästa steg.



Dielektriskt material och det andra ledande materialet

Över de ledande kolnanorören appliceras ett materiallager som fungerar som isolerande dielektriskt material. Slutligen läggs ett andra materiallager som andra ledande elektrod (katod) och kondensatorn är färdig.

HÄR VÄVS FRAMTIDEN MED NANOTRÅDAR

I den inofficiella tävlingen om den minsta halvledaren borde nanotråden ligga bra till. Ett hårstrå är ungefär det minsta vi kan se med bra upplösning, cirka 50 miljondelar av en meter. Nanonivån är tusen gånger mindre. För att se den världen krävs ett svepelektronmikroskop. Nanotrådar brukar vara från fem nanometer och uppåt. Forskare i Lund har i över 20 år studerat dessa märkliga trådar. Forskarna kan skapa trådarna.

En av forskarna är Magnus Borgström, professor vid Lunds centrum för nanovetenskap, Nano Lund. – Mitt område är fasta tillståndets fysik, men min forskning är tvärvetenskaplig. Så jag är också kemist. Man måste nog kunna lite kemi för att syssla med det jag gör. Jag skulle nog idag kalla mig materialvetare.

Magnus Borgström har arbetat som forskare på Philips i Nederländerna med ljusdioder och hur man gör transistorer av nanotrådar. Han gjorde sin post doc i Schweiz på kvantoptik och tillhörde en kvantelektronikgrupp i Zürich.

Magnus Borgström förklarar nanotrådarnas fördelar.

– De är tunna och man kan i princip kombinera vilka material som helst. Vi kan koppla ihop material som i sig inte är kompatibla och det är lätt att göra sammansatta komplexa strukturer. Det krävs fyrtio olika lager för att ta

hand om tre sorters ljus och man kan matcha hela solspektrat. En så kallad trippel-övergångscell består av lager på lager av olika material som absorberar olika delar av solspektrat för att täcka hela spektrat och minska värmeförlusten. Trådgeometrin gör att man slipper spänningar som kan leda till defekter. Trådarna innebär också att man får väldigt mycket yta på en liten volym.

Solceller och ljuskällor

Magnus Borgström har arbetat med fysiken bakom nanotrådarna i 15 år, men har som han säger nu "smugit in lite mer på applikationer" som solceller och ljuskällor.

Det handlar om ljusdioder. Med nanotrådar skulle man kunna skapa en helt ny arkitektur för ljusdioder. Ett stort problem med ljusdioder är att ljuset bromsas, det kallas total intern reflektion.

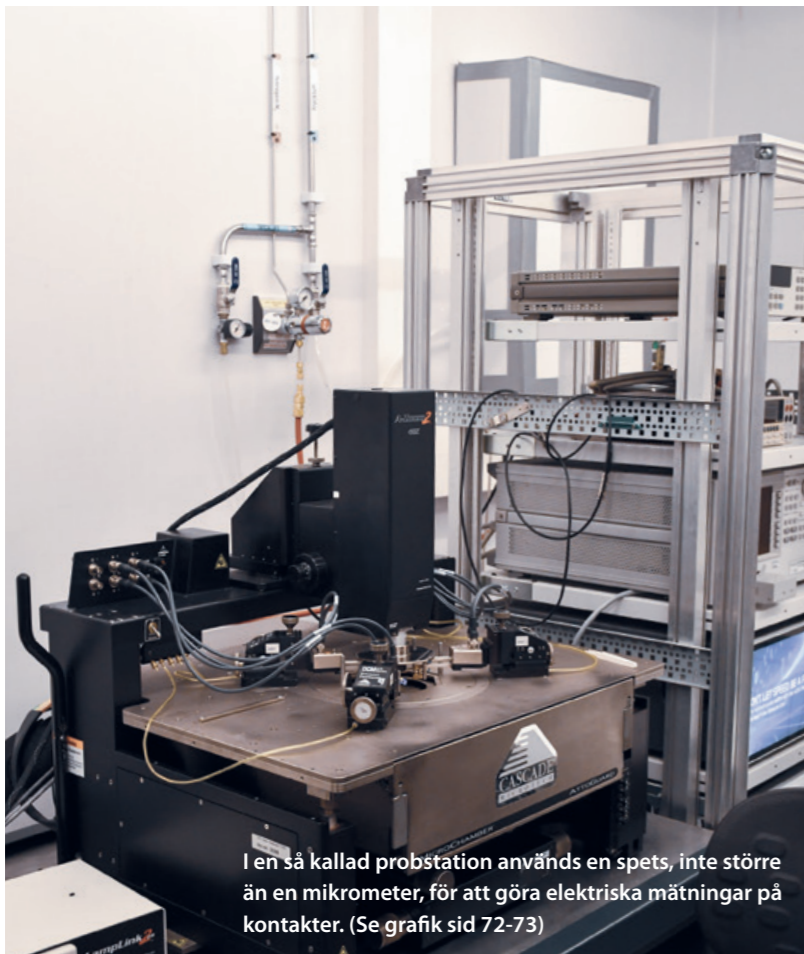
– Av ljuset som genereras inne i kristallen – en kristall är en halvledare

– stannar 96 procent av ljuset kvar inne i kristallen i en obehandlad LED-lampa. För att komma till rätta med detta försöker de i Lund göra något som är så litet att ljuset inte "ser" att det sitter inne i ett halvledarmaterial.

– Jag försöker göra väldigt små lysdioder. I labbet kan vi göra trådarna som vi vill att de ska se ut. Nyligen såg vi det första ljuset som garanterat kom ifrån grenarna som sitter på trådsstubben. Det ser ut som en granskog där stammarna är 200 nanometer och grenarna 20 nanometer. Laddningsbärarna trillar ned i grenarna och eftersom ljusets våglängd är större än 20 nanometer så fastnar inte ljuset,

Men om det lyckas, vad innebär det?

– Lamporna kommer att bli energisnålare. Verkningsgraden närmar sig hundra procent. Globalt skulle det innebära en revolution. De små fyrkantiga bitarna i LED-lampan är det som lyser. I stället för en film blir det små trådar som läcker ut ljuset. ▷



I en så kallad probstation används en spets, inte större än en mikrometer, för att göra elektriska mätningar på kontakter. (Se grafik sid 72-73)

– Belysning är ett fält, men optisk kommunikation är också intressant. Starka ljuskällor är intressant för mycket och än bättre om de inte drar mycket kraft för att drivas. En bra ljuskälla är den som levererar svagt till starkt ljus beroende på pålagd spänning och där effekten som behövs för att driva lampan till en viss lumen är låg. Dagens LED på 4W motsvarar den gamla sortens lampor med 40W.

Nanotrådar som antenner

I solceller fungerar nanotrådarna som antenner. Trådarna fångar ljuset. En vanlig solcell har en film. Går en bit av filmen sönder är solcellen förstörd. Om några nanotrådar försvinner lever solcellen vidare. På en kvadratmillimeter ryms fyra miljarder nanotrådar. Det krävs ett gram nanomaterial per kvadratmeter för att göra en solcell med en teoretisk verkningsgrad på 47 procent. Pinnarna motsvarar ett gram. En konsumentcell har idag typiskt en verkningsgrad på lite mer än 20 procent.

– Vi har lyckats med 17 procent och det räcker inte för att intressera industrin. Forskare i Nederländerna siktar på 80 procent. Det handlar om att bygga lager på lager för att ta hand om hela solljuset. För att göra nanotrådar används gas som innehåller utvalda ämnen. Gasen strömmar över metallpartiklar. Ofta används guld. Så skapas grunden för bygget. På denna grund växer nanotrådarna upp. Atomerna i gasen bildar en tråd. Man vet i stort hur det går till. Sedan är det "bara att riva av lagret med nanotrådar ungefär som när man vaxar benen", säger Magnus Borgström. Hur bra trådarna växer kan forskarna se direkt i ett speciellt mikroskop, environmental transmission electron microscope, Etem.

I "en stor blå maskin", MOVPE, läggs lager på lager av atomer. Om man börjar på morgonen har man nanotrådar till lunch.

Den snillrike doktoranden

Nanotrådarna är exempel på grundforskning. Magnus Borgström har fått

pengar från Vetenskapsrådet för fyra års forskning rörande ljusdiodutvecklingen. Energimyndigheten finansierar solcellerna och delfinansierar ljusdiodutvecklingen. Solcellsprojektet tog slut under sommaren men fortgår i ett annat solcellsprojekt där trådarna inkorporeras med mineralet perovskiter, även det finansierat av energimyndigheten och delvis EU (Generation Nano).

– Fyra år är inget i grundforskning. Det tog två år att bara komma hit från när tanken dök upp. Men man måste vara tacksam. Forskning tar ofta längre tid än vad som syns på en powerpointbild. Det har forskats på solceller i mer än ett sekel.

Men då och då kommer ett genombrott.

– Det som jag förgäves försökt att göra i tio år lyckades vår doktorand Lukas Hrachowina lösa. Vi hade förstås pratat om det, men jag trodde slutligen nästan inte att det skulle fungera. Men när katten är borta...

– Lukas syntetiserade solcellstrådar och genom att karakterisera dem i en snabb feedback loop till syntes med avseende på den elektrostatiska potentialen i trådarna lyckades han ta kontroll över materialdesign och dopning så att vi slutligen bröt barriären till tandemceller. Ett bandgap kan maximalt ge cirka 30 procents verkningsgrad. Med flera material i tandemkonfiguration kan man åstadkomma mycket mer. Tidigare har vi haft de olika delarna i en tandemcell var för sig, men inte lyckats få ihop dem i ett fungerande system. Genom växt och karakterisering har vi nu inte bara två celler utan genom att kopiera konceptet strax därefter gjort tre (se grafik sid 72–73). Nu påbörjas arbetet med att gå ifrån enkla trådar som mäts i sem (svepelektronmikroskop) till solceller över ytor och det blir mycket arbete. Genombrottet är alltså tandemceller genom kombination av olika material i nanotrådarna. I filmer har detta gjorts sedan länge.

Utländskt intresse

Lukas Hrachowina är ett bra exempel på vad utländska studenter betyder för forskning i Sverige. NanoLund har ambitionen att bli ett internationellt ledande forskningscentrum för nanovetenskap. Att döma av intresset från utlandet verkar det gå bra.

»Lamporna kommer att bli energisnålare. Verkningsgraden närmar sig hundra procent. Globalt skulle det innebära en revolution.«

– Jag utlyste en doktorandtjänst och fick 200 sökande. En kom från Sverige, men var tyvärr knappt kvalificerad, säger Magnus Borgström.

Forskning är kombinationen av forskning och utrustning.

– Utan den kvalificerade utrustningen, som till exempel mikroskopet, hade vi aldrig kommit hit. Bara byggnaden och maskinparken kostar en halv miljard. Det är enorma kostnader bara att hålla en ren miljö. Forskning är till viss del en materialsport. Har du pengar köper du fin utrustning och blir en bättre forskare. Men även om man har de bästa grejerna är det ingen garanti för att det blir bra forskning. Det handlar bland annat om att kunna utnyttja verktygen och kunna använda dem på annorlunda sätt.

Det satsas i Lund på framtiden och forskningen. En helt ny stadsdel, Brunns- hög, växer upp. Här ska enligt kommunens hemsida 40 000 bo, arbeta och studera. Brunns- hög ligger i gränslandet mellan stad och landsbygd. Den stora forskningsanläggningen MAX IV – som

presenteras i nästa nummer av Omvärld – är på väg att bli färdig och Magnus Borgströms verksamhet ska också flyttas ut.

NanoLund är Lunds universitets centrum för nanovetenskap. Över 50 forskargrupper inom fakulteterna för teknik, naturvetenskap och medicin är verksamma i detta strategiska forskningsområde. Det finansieras av den svenska regeringen, och är Sveriges största forskningsmiljö inom nanovetenskap och nanoteknologi. Även Chalmers i Göteborg har nanoforskning.

Och vad kommer ut i andra ändan i framtiden?

– Vi kommer att använda mer och mer energi så alla källor är välkomna, säger Magnus Borgström. Vätgas blir jättestort. Det är inte billigare än solceller, men kan framställas med hjälp av solceller så man slipper fossilt spill. Forskningen går framåt. Kiselindustrins väg är imponerande. På 1980-talet sade man att utvecklingen inte kunde gå längre. Kisel kommer fortsätta att vara dominerande på solcellsområdet. Våra

ska ses mer som detektorer eller små celler som är invädda i kläderna som laddar mobilen när du cyklar.

Nanosolceller i rymden

Rymden kommer att spela en större roll. Vi har ett samarbete med Caltech i USA som utsatt våra nanosolceller för simulerad rymdmiljö. De är mer motståndskraftiga än vanliga solceller och har 40 gånger längre livslängd. Vikten betyder mer än kostnaden. Vi ska skicka upp våra solcellsceller i rymden. De är på en kvadratcentimeter och tillverkas här i labbet i Lund som ingår i det så kallade Myfabnätverket.

– Vad gäller energi så tror jag att man hellre vill ha en energikälla som man kan ha i handen. En källa som är mer pålitlig än vind och ljus. Idag finns alternativet vattenkraft och kärnkraft. Vad gäller våra solceller hoppas jag att vi kan nå en verkningsgrad på cirka 50 procent. Men det dröjer och jag har krupit till korset och nyligen skaffat mig vanliga kiselceller. □

Nanotrådar för ström och ljus

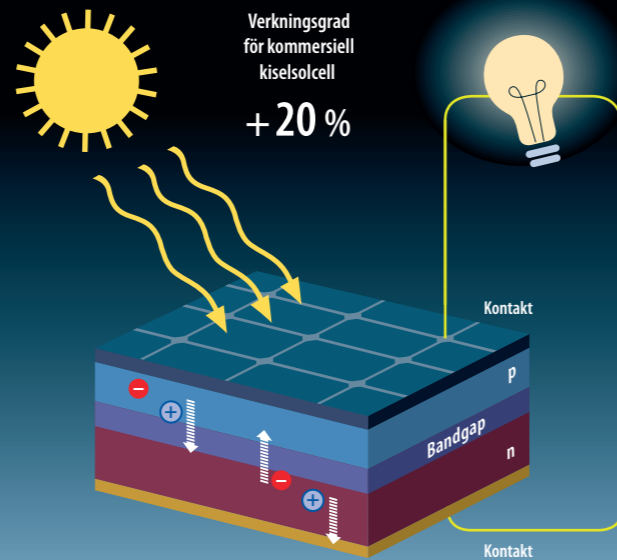
Både solceller och ledlampor är i grunden dioder med pn-övergångar. Nanotrådar byggs till skillnad från konventionella platta kiselstrukturer på höjden vilket gör det möjligt att rymma fler pn-övergångar än någonsin på en liten yta. Nanotrådarna tillåter också att man utan problem kan kombinera nästan vilka material man vill – för att på så sätt matcha solspektrat maximalt.

Vanlig solcell

En solcell är en typ av fotodiod och tillverkas vanligtvis av kisel med ett p-dopat och ett n-dopat skikt. När n-skiktet och p-skiktet förs samman skapas en pn-övergång som fungerar som en diod med ett bandgap.

När p och n sidan kombineras (efter jämvikt) går ingen ström genom pn-övergången. Inbyggd potential kan däremot generera en fotostrom om man lyser på den. Genom att koppla ihop p- och n-sidans kontakter skapas en ström av elektroner som kan driva exempelvis en lampa.

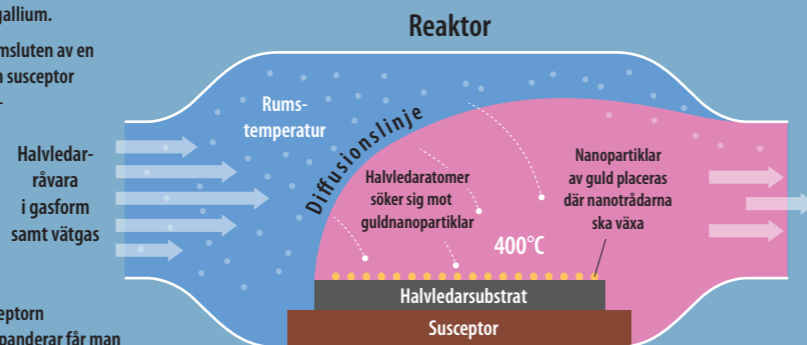
Nästa alla solceller byggs idag av kisel och den maximala verkningsgraden börjar plana ut vid 18–20%. Med nanotrådar hoppas man på en verkningsgrad upp emot 80%.



Att bygga nanotrådar

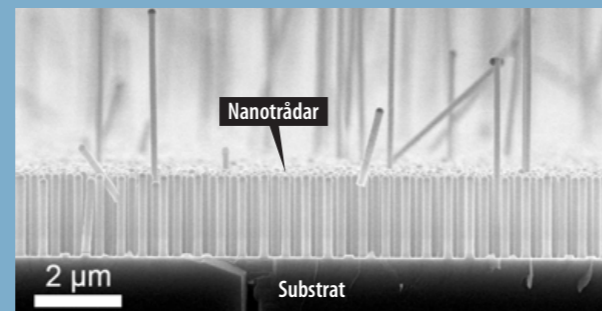
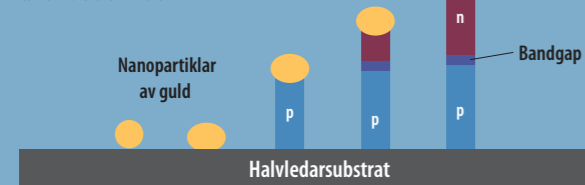
MOVPE (Metal Organic Vapour Phase Epitaxy) heter metoden som växer nanotrådarna. Det är en avancerad maskin i vilken kristaller kan odlas och även så kallade nanotrådar.

1. I botten på maskinen sitter behållare som innehåller halvledarråvaror i molekylform till nanotrådarna, exempelvis trimetyllindium eller trimetylgallium.
2. I mitten av maskinen sitter en reaktor som består av ett glasrör omslutet av en energikälla, exempelvis en RF-spole. I botten av reaktorn sitter en susceptor – ett material som används för sin förmåga att absorbera elektromagnetisk energi från RF-spolen och omvandla den till värme.
3. På susceptorn sitter ett halvledarsubstrat som försätts med nanopartiklar av guld som markerar var nanotrådarna ska växa till. Se figur till höger.
4. Halvledarråvarorna blandas med vätska som fungerar som bärgas. Blandningen håller rumstemperatur och skickas in i reaktorn. Väl där möter den den höga temperaturen från susceptorn och expanderar kraftigt på grund av värmen. När blandningen expanderar får man en koncentrationskillnad och några av råvarumolekylerna sprider sig ner mot den varma susceptorn och trillar sönder.
5. Halvledaratomen i halvledarråvaran frigörs - attraheras av guldpartiklarna och kan börja växa till på halvledarsubstratet



Ett atomlager i taget

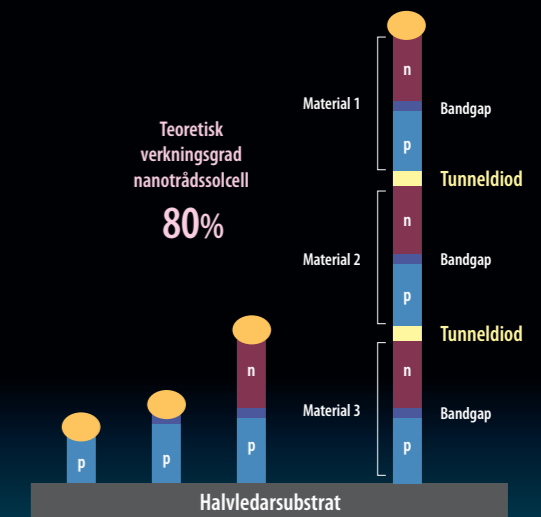
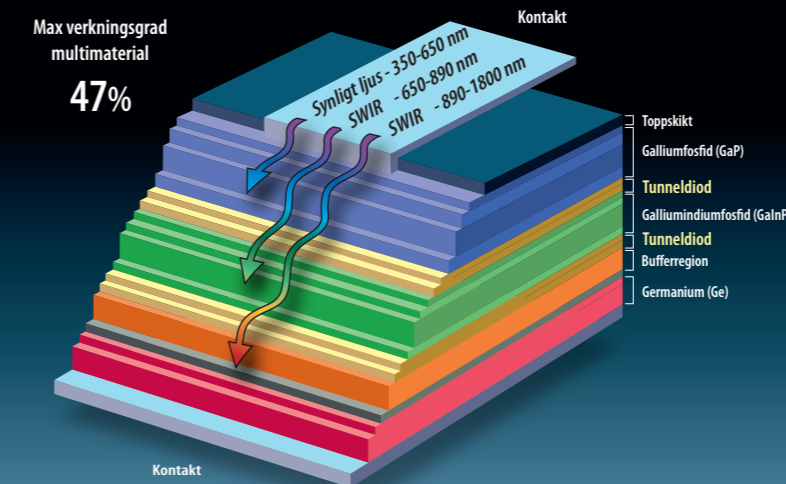
Atomlager för atomlager byggs trådarna upp, dopämnena ger ett material med positiva laddningsbärare och ett annat material med negativa. I skarven uppstår en pn-övergång med bandgap. Hela tillväxtprocessen för nanotrådarna tar cirka två timmar.



Strukturerna är oerhört små. På en kvadratmillimeter rymts 4 miljoner nanotrådar.

Flera bandgap – högre verkningsgrad

För att höja verkningsgraden i konventionella solceller kan man bygga upp till 30-40 skikt i flera olika halvledarmaterial vilket skapar regioner med flera olika pn-övergångar. På så sätt kan man utnyttja mycket större del av soljusets våglängdsområde med bättre verkningsgrad som följd. Problemet med att använda flera olika halvledarmaterial i platta strukturer är att spänningar i materialen lätt uppstår och det skapas defekter.

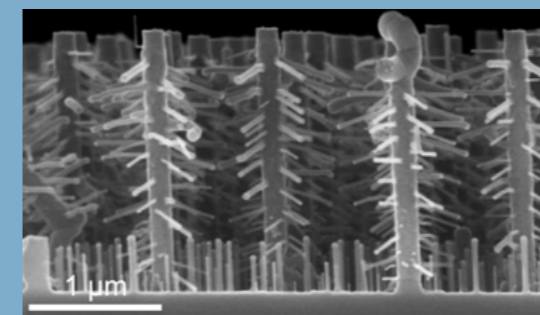
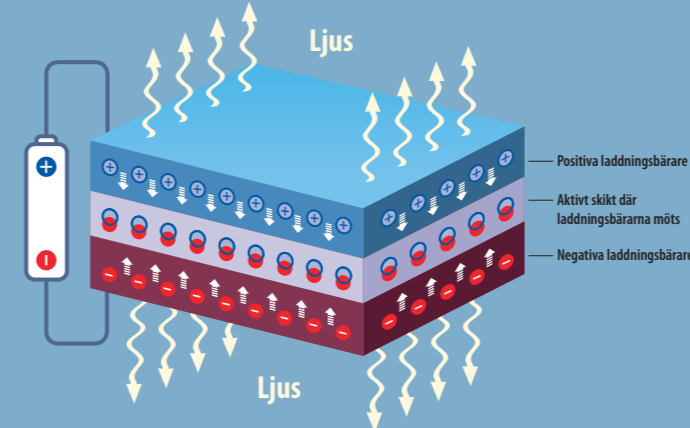


Flera bandgapsregioner kan skapas även med nanotrådar. På grund av det lilla formatet är trådarna inte känsliga för hur man kombinerar olika material.

För att kombinera olika materialgrupper används så kallade tunnel-dioder.

Led-lampor

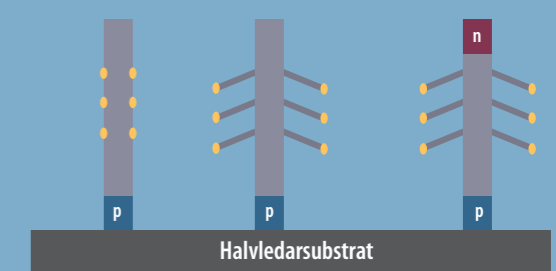
Kärnan i en vanlig LED-lampa består av ett n-skikt med negativa laddningsbärare och ett p-skikt med positiva hål som laddningsbärare. Ligger man en spänning över ljusdioden så drivs de olika laddningsbärarna mot varandra och ljus uppstår. Kisel används inte till ljusdioder över huvud taget, istället används III-V material. Ett stort problem är att ljuset är svårt att extrahera ur materialen. Det görs i dag förträffligt men till kostnad av omständiga och dyra processer.



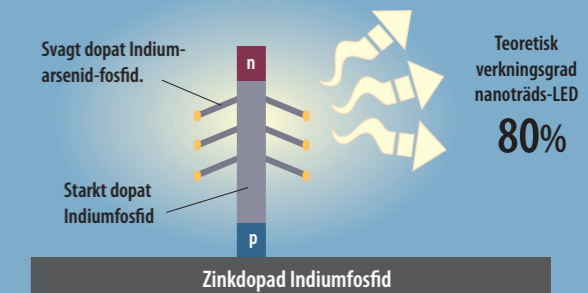
Fullt utvuxna nanotråd. Stammarna är ca 200 nm tjocka, grenarna ca 20 nm.

Nanogrenar

Genom att istället använda en nanostruktur där en nanotråd har formen av en stam med grenar kan man lura ljuset. Är nanostrukturen tillräckligt liten så "ser" inte ljuset att det sitter i ett material.



Nanostrukturen byggs upp ett atomlager i taget på samma sätt som vid solceller. Först växer man stammen enligt samma princip som på föregående sida. Sedan deponerar man nya guldpartiklar på stammarna för att därefter växa grenarna.



Stammen är starkt dopad, grenarna svagt dopade. Ligger man på en spänning trillar negativa och positiva laddningsbärare ner i grenarna. Där pressas de nära varandra i brist på utrymme. En elektron ser ett hål som den trillar ner i och ut kommer ljus. Våglängden på synligt ljus (cirka 500 nm) är större än våglängd/brytningsindexet i nanogrenarna som har en diameter på 20 nm. Det gör att ljusvägen inte kan fångas in.

KRISERNA AVSLÖJAR BRISTEN PÅ BEREDSKAP

Med pandemin kom bristen på halvledare. Det blev tyst i bilfabrikerna. Någon plan B fanns inte. Ukrainakriget har visat på högteknologins säkerhetspolitiska betydelse. Lagg därtill spänningen mellan Kina och det ledande halvledarlandet Taiwan. Tomas Ries, har i många år forskat i dessa ämnen. Han är docent vid Försvarets högskolan och skröder inte orden om krisberedskapen i väst.



Hela den västliga världens katastrofberedskap är usel. Trots att forskningen tidigt visar på faror så görs ingenting förrän det händer. Det har bara varit rena turen att inga allvarliga katastrofer inträffat så att allt kollapsar. Hittills har EU endast upplevt hanterbara kriser, som asyflodvägen 2015, Covid 2019, och nu Ukrainakriget 2022, men inga katastrofer med systemhotande kollaps. Så vi har haft tur, eftersom dessa fungerar som väckarklockor för våra sovande samhällen och politiska ledare.

– Jag har jobbat med det här i 30 år och är så trött på att de ansvariga inte förstår. Det är delvis förståeligt. Dels är hoten för abstrakta – tills de uppstår – och dels är beslutsfattarna för upptagna med en fors av mindre men omedelbara utmaningar. När det gäller resiliens är problemet även jakten på den billigaste lösningen. Då skalas överflödet bort och man förlorar resiliensen – kapaciteten att ta emot en smäll, överleva, och kravla vidare. När solen skiner och allt är normalt är både

regering och näringsliv bara fokuserade på en sak, att hitta den billigaste lösningen. När det blir ett problem i flödet så sitter de där handfallna. Frukantansvärt aningslöst. Det finns en förklaring. Vi har en generation politiker och i viss grad företagsledare som i 30 år aldrig behövt bekymra sig. Solen sken, krig och annat hemskt var slut, det vara bara att tuta och köra på.

Beredskap och medvetenhet

– Under kalla kriget var Sveriges civila beredskap en ett av de bästa i världen. Då fanns det en medvetenhet, allt handlar om medvetenhet, man var villig att betala för resiliensen, för den kostar, det ska man komma ihåg. Covid och Ukraina har fått ledarna i väst att vakna.

Tomas Ries säger sig samtidigt förstå beslutsfattarnas dilemma.

– Vi forskare kan komma med en lista på 25 fruktansvärda katastrofer och en prognos att åtminstone två-tre kommer att inträffa inom 20 år. Då blir svaret vilken och när då? Det vet vi inte. Jaha, då får det vara. Fast det är en sanning med modifikation. En bra grundbered-

skap mot katastrofer generellt kan man alltid anpassa till specifika fall. Finlands, Taiwans, Sydkoreas och Israels höga totalförsvarsberedskap som var riktade mot krig kunde snabbt anpassas till Covid-19.

Lagom globalisering

Pandemin och Ukrainakriget belyser hur känslig den globala logistiken är. Tomas Ries talar ofta om flöden. Det kan gälla olja, högteknologi, mat, vapen och mycket annat. Inte minst kunskap.

– Man måste skilja mellan globalisering och hypereffektivitet. Flöden och globalisering kommer att fortsätta, men den extrema globaliseringen med fullkomligt beroende på just-in-time-delivery kommer att minska. Men det omvända – att återgå till små tekniska öar – är lika hemskt. Vi gick för långt, nu måste vi hitta en medelväg.

– Covid visade på bristerna i flödessystemet, vi tvingades att bromsa transport av människor och varor. Där såg vi vad som händer när man inte har en egen produktion av skyddsmasker och annat. Så Covid var en väckar-

klocka, men å andra sidan visade Covid på globaliseringens styrka. Vaccin kom fram på rekordtid. Vi blev medvetna om att vi är beroende av Asien för nästan allt gällande sjukvård. Ukrainakriget har visat hur tekniska och ekonomiska flöden använts som effektiva vapen, inget nytt i sig, men sanktionerna mot Ryssland får på grund av flöden och globalisering snabbt en stor effekt på våra egna samhällen. Världen går in i ett bredare schema som man just börjat forska i och som på engelska heter weaponization of globalization. Vi går förmodligen mot en värld där teknisk infrastruktur och ekonomiska flöden

kommer att spela en större säkerhetspolitisk roll.

– Det finns en ny medvetenhet i Sverige om att man ska akta sig för kinesisk it. Man lät inte Huawei bygga 5G-nätet. Då väljer man hellre att samarbeta med länder som man bedömer som mindre hotfulla. Det skapar tekniska arkipelager i världen, vilket ingår i globaliseringsmodifieringen som händer just nu.

– Vi går mot en ny världsordning. Längre fungerade världen enligt principen att de som handlar och är ekonomiskt beroende av varandra inte tar till våld. Angela Merkels

Rysslandspolitik var kanske det land som drev det här längst. Vi har inget alternativ sade hon. Det visade sig att hon hade fel. Det var soliga tider och en lycklig familj med USA, Kina och Europa. Flödena gjorde alla rikare. Men så började det gnissla i den lyckliga familjen. Kina övergav linjen där man betonade sin svaghet mot en mer aggressiv politik. Vladimir Putin uttalade sig till en början mer västvänligt, men nu utmålar han väst som sin huvudfiende. Vi kan se konturerna av en ny världsordning där maktspelet och familjesämjan pågår sida vid sida. Turkiet till exempel deltar >

»Jag har jobbat med det här i 30 år och är så trött på att de ansvariga inte förstår. Det är delvis förståeligt. Dels är hoten för abstrakta – tills de uppstår – och dels är beslutsfattarna för upptagna med en fors av mindre men omedelbara utmaningar.«



Foto: Getty Images

i det här spelet utan att välja sida. I den här nya världsordningen kommer flöden, och inte minst de högteknologiska att spela en stor roll.

Antingen har man sin egen tekniska infrastruktur eller så har man någon annans.

– Den som behärskar den tekniska infrastrukturen kontrollerar också sin del av världen. Hela samhället och ekonomin är så beroende av den tekniska infrastrukturen som kan kontrolleras utanför de nationella gränserna, att det uppstår tekniskt säkerhetspolitiska öar som sedan sammankopplas med politiska ideal. Vi går mot en teknologiskt multipolär värld, där Kina, USA, EU och Indien blir tunga poler.

– Men Ryssland har inte en plats här. Putin har inte lyckats modernisera den ryska ekonomin och därmed det ryska samhället. Båda är förtryckta och genomkorruperade. Då kan man inte heller utvecklas högteknologiskt. Ukrainakriget har visat på bristerna. Till och med stridsvagnarna är till stor del beroende av västteknologi, avancerade robotar 80–100 procent. Här ingår förstas halvledare. Ryssland är militärt helt beroende av högteknologi från

» Den som behärskar den tekniska infrastrukturen kontrollerar också sin del av världen.«

väst. Ryssland är redan nu överkört, embargot gör att de inte kan bygga nytt. Vi som forskar på det här är inte förvånade att ryssarna är så beroende av västteknologi.

– Därmed blir Ryssland nu beroende av Kina för högteknologi, kommunikationer och teknisk infrastruktur. Det gäller inte bara militären utan hela samhället. Inte minst Rysslands ekonomiska fundament, råvaruutvinning, kräver högteknologi. Kineserna kommer nog tacksamt att leverera högteknologi och infrastruktur som de gradvis förvandlar från tekniskt beroende och kontroll till politisk kontroll. Så länge Ryssland inte självt kan tillverka en teknisk infrastruktur blir man beroende av andra. Nu ligger Kina närmast till, men det kan i och för sig leda till en kursändring i Moskva, att det ändå är bättre att vara beroende av väst än av Kina.

Reagan vann första hybridkriget

Världen är inne i en ny upprustning. Polen beställer tusen stridsvagnar från Sydkorea. Tyskland rustar upp och har beställt 35 avancerade stridsflygplan med vapen från USA. Amerikanska precisionsvapen flödar in i Ukraina. Sovjet förlorade det kalla kriget när USA på allvar gick in i informations-samhället.

– Ronald Reagan var mästaren i detta spel. Han låg bakom den mest sofistikerade strategin för att knäcka Sovjetunionen. Det var en kombination av att han rustade upp, såg till att oljepriserna gick ner, införde ett högteknologiskt embargo och startade ett gigantiskt forskningsprojekt Strategic defense initiative, stjärnornas krig. Samtidigt stödde han det sociala motståndet mot Sovjetväldet

i Östeuropa och Sovjet självt. Det var det första exemplet på ett hybridkrig.

– Det första Irakkriget 1991 visade att Ryssland inte kunde mäta sig med den amerikanska högteknologin och den ryska militären insåg att man inte kunde mäta sig med USA i ett konventionellt krig. Nästa Irakkrig, 2003, bekräftade den amerikanska överlägsenheten. Detta innebar att Ryssland försökte kompensera med att utveckla fler taktiska kärnvapen. Men de är främst politiska. De kan användas för att avskräcka eller utpressa andra. Efter Kubakrisen 1962 när världen stod vid avgrunden insåg både USA och Sovjet att det var bäst att tala tyst om kärnvapnen och den inställningen rådde kalla kriget ut. Men nu har vi för första gången en statschef som i desperation hotar med kärnvapen.

Ryssland sitter i smeten

– Putins diktatur kan inte modernisera ekonomin för det innebär att man frigör samhällets krafter. Deng Xiaoping lyckades med detta och satte fart på ekonomin. Nu är det hårdare, men Kina surfar på Dengvägen. Ryssland måste frigöra de mänskliga resurserna och för det krävs ett fritt liberalt system. Historien har sprungit ifrån Ryssland. Putin har nu bara tre vapen: cyber, både för informationskrig och sabotage; kärnvapen; och sist men inte minst viktiga naturresurser – som de kan utpressa oss med om vi är beroende av dem. Men även deras olja- och gasutvinning kräver högteknologi. Ryssland sitter i smeten och därför är Putin desperat. Historien upprepar sig. Sovjetunionens diktatur förmådde inte utveckla samhället. Detsamma ser vi nu när den ryska diktaturen under Putin inte förmår att växla övergången från det tunga industrisamhället till ett högteknologiskt informationssamhälle.

Kina klarade den här övergången till ett tekniskt modernt samhälle. Kineserna är mycket företagsamma. Det finns ett starkt humankapital. Men det ryska folket behöver inte vara utspelat – det krävs en liberal ledning som frigör det. Joseph Brodsky uttryckte det här perfekt, han fick frågan vad

som händer med ett land som dödar sina poeter? Det blir fördummat. Man måste frigöra humankapitalet. Annars går man under.

Taiwan och Kina

Covid, Ukrainakrig och för halvledarnationen Taiwan en risk för såväl krig som vulkanutbrott. Under sommaren hettade det till i Taiwan. USA demonstrerade sitt stöd till Taiwan och Kina svarade med en militärmanöver.

Är det sabelskrammel eller en risk för krig?

– Det finns tre aspekter. Militärt är utgången av en invasion eller blockad av Taiwan mycket osäker för Kina. Kina har byggt upp en ståtlig militär på papper, men den har aldrig prövats. Oerhört mycket kan gå fel och det vet de. För det andra vore de ekonomiska och tekniska konsekvenserna av ett krig väldigt stora för Kina. Landet är helt beroende av den globala handeln och särskilt på handeln med USA och EU. Det kunde leda till en ekonomisk och social kollaps i Kina. För det tredje kunde det utrikespolitiska priset bli mycket tungt. Vi måste dock förbereda oss på att klara de tekniska och ekonomiska konsekvenserna av ett sådant krig.

Nu har medvetenheten saktat börjat vakna

– Just in time, just enough fungerar bra om allt fungerar som normalt. Det är kostnadseffektivt och frestande att ta till för fattiga länder, profithungriga företag och ivriga konsumenter. Men det fungerar bara så länge solen skiner och allt flödar. Och nu gör den inte det längre, vi går mot mörkare tider. I Finland har man aldrig trott på det eviga solskenet.

– Kalla kriget var extremt farligt för Finland. Det upplevdes som ett reellt hot hela tiden. Alla länder som hade med Ryssland att göra på det ena eller andra sättet är medvetna om det ryska hotet. Det gällde inte i Sverige. Medvetenheten är bottenplattan. Antingen tar man hotet på allvar, eller så gör man som när man 2015 lade ut driften till IBM som anlitade företag i Tjeckien och Serbien. Hela körkortregistret låg ute. Generaldirektören

misstänktes för brott och tvingades att avgå. Det blev KU-anmälan och skandalen rullade på i flera år.

– I många år flödade högteknologin från väst in till Ryssland. Näringslivet tjänade bra och politikerna lovade att det inte skulle bli något krig. Nu finns medvetenheten om att det som köps av oss kan användas mot oss. Säpo har alltid påpekat detta.

– Fröet är sått. Försvarshögskolan har kurser för samhällets beslutsfattare och vi har märkt att intresset har ökat starkt. Försvarsmakten och Säpo, har känt till hotet länge, men våra politiska ledare vaknade först efter Putins invasion av Ukraina 2014. Men det var först efter det att Covidpandemin klagjorde faran med vårt extrema beroende på globala flöden som behovet av starkare nationell resiliens erkändes. Vilket flödeskonsekvenserna av kriget i Ukraina ytterligare kommer att förstärka denna vinter, med stigan-de el och matpriser.

Tomas Ries pekar på två stora frågor. Flödena av mikroteknologi och behovet av att skapa resiliens. Den andra stora frågan är hur denna teknologi påverkar krigföringen och vilka lärdomar som kan dras av kriget i Ukraina.

– Det är ett krig på flera olika nivåer från leriga skyttegravar till högteknologiska underrättelsesatelliter. Högteknologin har ett stort inflytande på krigets förlopp. Men krigets två andra avgörande komponenter – vilja och färdighet – fortsätter att vara lika viktiga. Och på båda dessa plan har Ukraina visat en stor överlägsenhet gentemot Ryssland.

I februari trodde inte många utanför Ukraina på en seger. Nu verkar den vara möjlig. Men även hemmafrontens moral är avgörande. Kriget kan mycket väl avgöras av om det ryska samhället eller det västliga, vars stöd Ukraina är beroende av, först hukar sig för uppoffringarna i deras vardagsliv. □

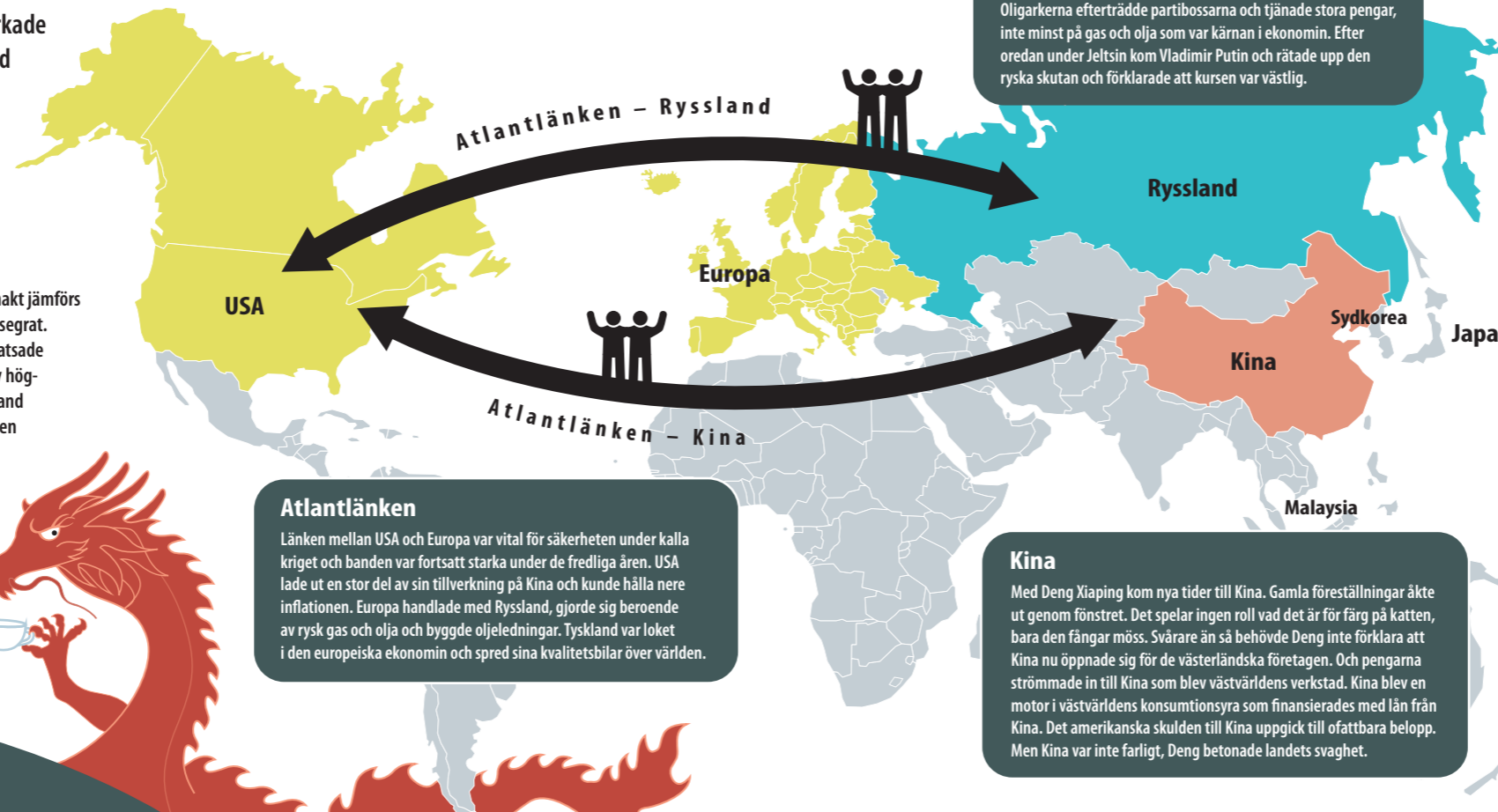
Nya flöden – ny världsordning

Under 1990-talet ingick halvledare i det nät av flöden som band samman Ryssland, Kina och USA. Ryssland verkade vara på väg att bli som ett västland. Samovaren stod i bokhyllan Billy. Sedan vände allt. En ny världsordning träder fram och Ryssland lämnas utanför.

1990-tal

Den lyckliga familjen

Berlinmuren faller 1989, Sovjetunionen försvinner 1991 och USA:s makt jämförs med när Romariket stod på topp. Den liberala demokratin sades ha segrat. Världen avrustade. Ryssland kallades för demokrati. Västmakterna satsade på ett fredligt Ryssland och sålde ryska aktier. Världens flöden, varav högteknologi och halvledare är ett, sökte sig till några huvudfåror och band samman USA, Kina, Europa, Ryssland och Taiwan. Den lyckliga familjen kunde samlas i sämja. Alla kurvor pekade åt rätt håll.



Ryssland
Efter kommunismens fall avslöjades Rysslands svaghet. Det gamla gardet misslyckades att ta tillbaka makten. Boris Jeltsin utmanade kuppmännen. Väst satsade på det demokratiska Ryssland och hjälpte till att skrota ryska massförstörelsevapen. Oligarkerna efterträdde partibossarna och tjänade stora pengar, inte minst på gas och olja som var kärnan i ekonomin. Efter oredan under Jeltsin kom Vladimir Putin och rättade upp den ryska skutan och förklarade att kursen var västlig.

Atlantlänken
Länken mellan USA och Europa var vital för säkerheten under kalla kriget och banden var fortsatt starka under de fredliga åren. USA lade ut en stor del av sin tillverkning på Kina och kunde hålla nere inflationen. Europa handlade med Ryssland, gjorde sig beroende av rysk gas och olja och byggde oljeledningar. Tyskland var loket i den europeiska ekonomin och spred sina kvalitetsbilar över världen.

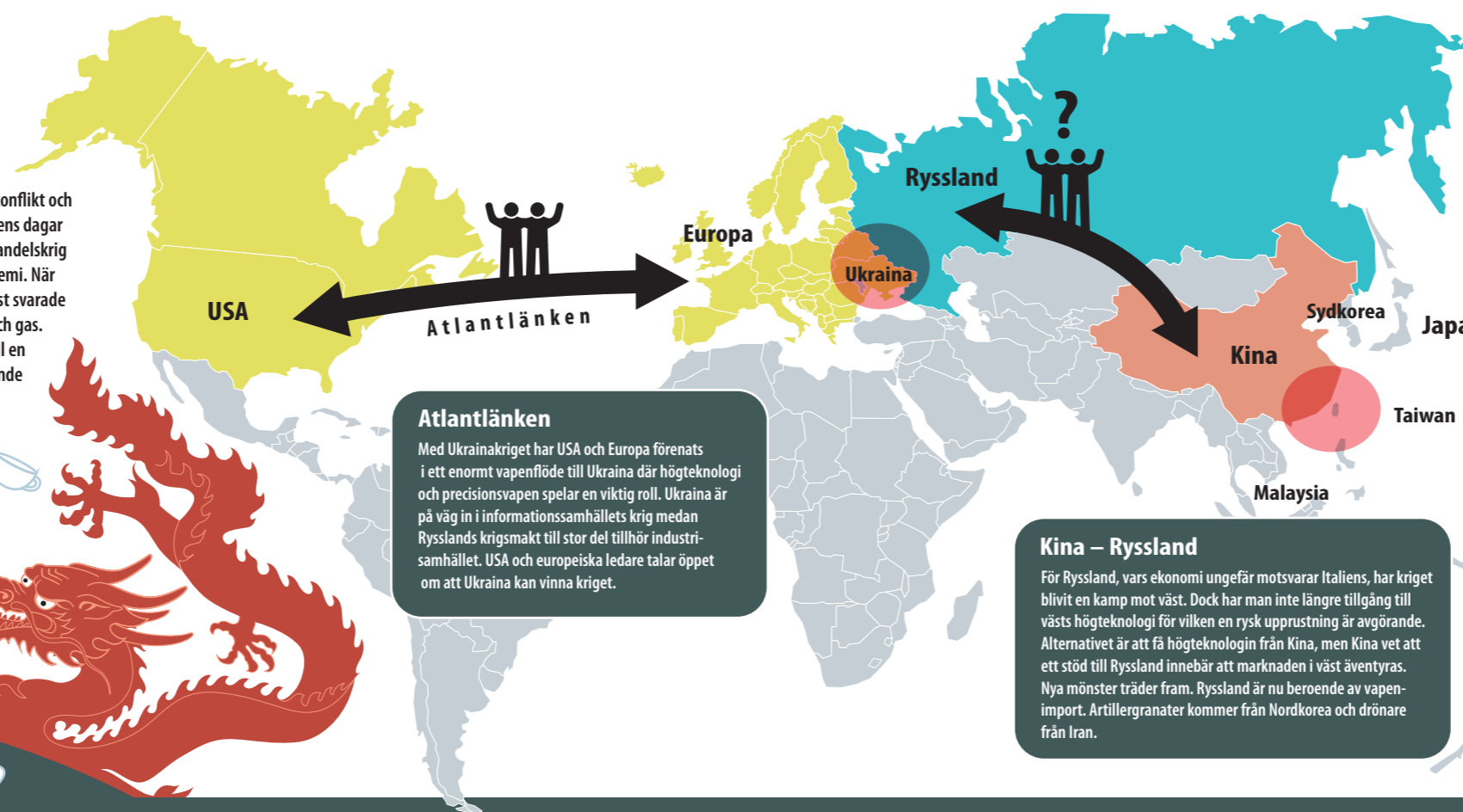
Kina
Med Deng Xiaping kom nya tider till Kina. Gamla föreställningar åkte ut genom fönstret. Det spelar ingen roll vad det är för färg på katten, bara den fångar möss. Svårare än så behövde Deng inte förklara att Kina nu öppnade sig för de västerländska företagen. Och pengarna strömmade in till Kina som blev västvärldens verkstad. Kina blev en motor i västvärldens konsumtionsrya som finansierades med lån från Kina. Det amerikanska skulden till Kina uppgick till ofattbara belopp. Men Kina var inte farligt, Deng betonade landets svaghet.



2000-tal

Gnissel på familjemiddagen

En bit in på det nya seklet började stämningen sjunka på familjeträffarna. Putin beklagade 2005 att Sovjetunionen brutit samman. 2008 gick ryska trupper in i Georgien efter en lokal konflikt och 2014 kom invasionen av Krim. Därmed var den gamla världsordningens dagar räknade. När Donald Trump blev president i USA 2017 inleddes ett handelskrig med Kina där en epidemi 2019 spreds över världen och blev en pandemi. När den kulminerat kom nästa slag, den ryska invasionen av Ukraina. Väst svarade med sanktioner och Europa ställde in sig på en värld utan rysk olja och gas. Under tiden hade Kina under Xi Jinping växlat från undergivenhet till en aggressiv politik med uttalade hot mot Taiwan som är världens ledande halvledartillverkare. En ny världsordning träder fram där Ryssland ställs utanför.



Atlantlänken
Med Ukrainakriget har USA och Europa förenats i ett enormt vapenflöde till Ukraina där högteknologi och precisionsvapen spelar en viktig roll. Ukraina är på väg in i informations-samhällets krig medan Rysslands krigsmakt till stor del tillhör industrisamhället. USA och europeiska ledare talar öppet om att Ukraina kan vinna kriget.

Kina – Ryssland
För Ryssland, vars ekonomi ungefär motsvarar Italiens, har kriget blivit en kamp mot väst. Dock har man inte längre tillgång till västs högteknologi för vilken en rysk upprustning är avgörande. Alternativet är att få högteknologin från Kina, men Kina vet att ett stöd till Ryssland innebär att marknaden i väst äventyras. Nya mönster träder fram. Ryssland är nu beroende av vapenimport. Artillerigranater kommer från Nordkorea och drönare från Iran.



Ryskt halvledartrubbel

Dagens högteknologiska vapensystem innehåller ofta hundratals eller till och med tusentals halvledarkomponenter. Ryssland har länge försökt utveckla en egen halvledarindustri men en analys gjord av den brittiska tankesmedjan RUSI (Royal United Services Institute) visar att ryska vapensystem funna i Ukraina sedan februari 2022, är packade med komponenter som ursprungligen tillverkats framför allt av amerikanska företag.

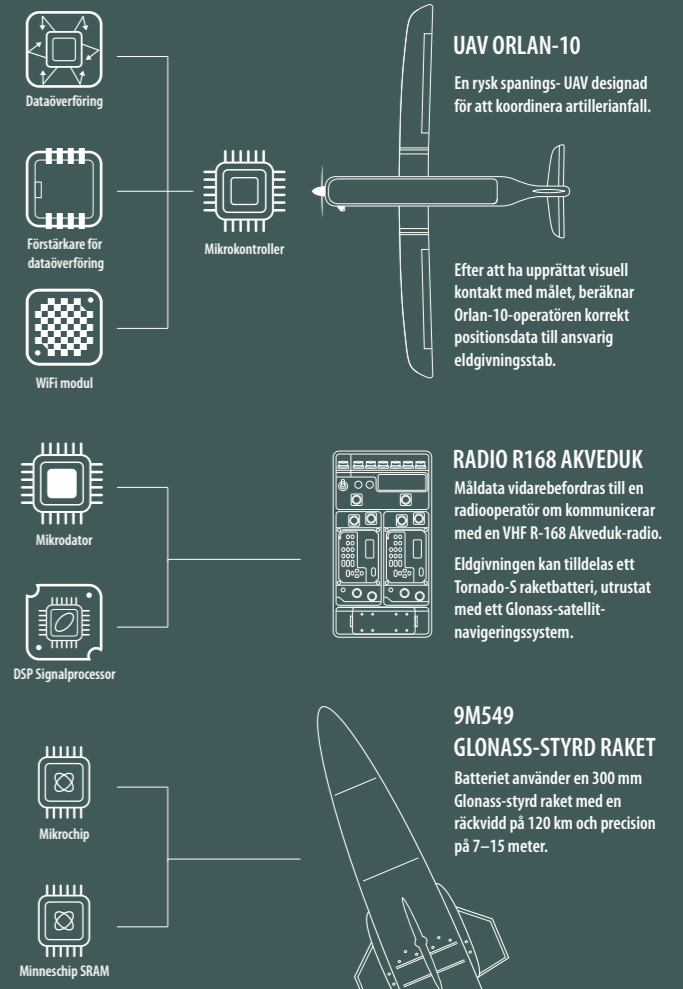
450 typer av halvledarkomponenter funna i ryska system

USA	318
Japan	34
Taiwan	30
Schweiz	18
Nederl.	14
Tyskland	10
Kina	6
S. Korea	6
Storbrit.	5
Österrike	2

Majoriteten av komponenterna kommer från 57 USA-baserade mikroelektroniktillverkare såsom Analog Devices Inc, Texas Instruments, Maxim Integrerad, Xilinx Inc och Microchip Technology

Västerländska komponenter i glonass-styrt robotsystem

Västerländska komponenter har hittats i 27 analyserade vapensystem, plattformar, radio-system och annan utrustning. Exempel är den ballistiska roboten Iskander och kryssningsroboten Kalibr. Ett annat exempel är beslutskedjan för den Glonass-styrda artilleriraketen med beteckning "9M549" här ingår en UAV, en radiolänk samt själva raketen. Nedan visas ett urval av de västerländska komponenttyper som påträffats.



UAV ORLAN-10
En rysk spanings- UAV designad för att koordinera artillerianfall.

Efter att ha upprättat visuell kontakt med målet, beräknar Orlan-10-operatören korrekt positionsdata till ansvarig eldgivningsstab.

RADIO R168 AKVEDUK
Måldata vidarebefordras till en radiooperatör om kommunicerar med en VHF R-168 Akveduk-radio. Eldgivningen kan tilldelas ett Tornado-S raketbatteri, utrustat med ett Glonass-satellit-navigeringssystem.

9M549 GLONASS-STYRD RAKET
Batteriet använder en 300 mm Glonass-styrd raket med en räckvidd på 120 km och precision på 7-15 meter.

Källa: RUSI

HÅLLBARA INNOVATIONER

Sverige är ett innovationsland. Det behövs innovationer för att lösa framtidens svåra frågor. Digitaliseringen – och här ingår halvledartekniken – är avgörande för hur vi hittar svaren säger Adela Saavedra Granholm, handläggare för industriell utveckling vid Vinnova. Vi måste kunna tekniken, samhällets behov, forskningen och hur industrierna ser ut. Vi tittar tio år framåt. Vår grund är hållbarhet och vi ska få forskning och företag att samverka.

Adela Saavedra Granholm är disputerad inom mikroelektronik och mikrovågsteknik och är utbildad i Brasilien och i Sverige.

– Den röda tråden i Vinnovas verksamhet är hållbarhet, inte minst på energiområden. Det är ett ökat intresse hos ungdomen för hållbarhet.

– Ungdomarna börjar förstå det. Utan halvledare finns ingen digitalisering som är grunden för utvecklingen av ett samhälle som ger nya jobb och en bättre miljö. Elektronik är viktig på flera plan. Den är viktig för vår vardag och för Europas konkurrenskraft.

Arvtagare till Nutek

Vinnova, Verket för innovationssystem, bildades 2001 och är en myndighet under Näringsdepartementet och nationell kontaktkommission för Horisont Europa, EU:s ramprogram för forskning och innovation. Delvis tog man över verksamheten från Nutek, verket för näringslivsutveckling 1991–2009. Vinnovas budget för forskning och innovation år 2022 är på 3,7 miljarder kronor. Vinnova har cirka 200 anställda. Vinnova är Sveriges innovationsmyndighet, säger Adela Saavedra Granholm.

– Uppdraget är att stärka Sveriges innovationsförmåga för att bidra till en hållbar tillväxt. Vårt arbete utgår från de mål för hållbar utveckling som FN antagit i Agenda 2030. ▷



»Vi ska kraftsamla och se till att forskning, samhälle och företag möts. Sverige är ett litet land som inte klarar sig utan samverkan.«

– Sverige har varit ett av de bästa innovativa länderna. Hur ska vi utnyttja den kraften? Var ska vi investera? Vad kan vi bidra med för att uppnå de övergripande målen? Hur kan utbildningen bli bättre? Vad kan tekniken bidra med för att bygga framtidens städer?

– Vi ska kraftsamla och se till att forskning, samhälle och företag möts. Sverige är ett litet land som inte klarar sig utan samverkan. Insatserna sker över tiden från några månader till fem år och ännu längre. Vinnova identifierar områden där vi behöver stärka innovationsförmågan och mobiliserar aktörerna för att skapa lösningar för identifierade problemen, stödja samverkan och se till att forskning utvecklas till företag. Grundforskning vilar på Vetenskapsrådet.

Förebyggande hälsovård

Om hållbarhet är den röda tråden så är forskning- och innovationsprogrammen ett verktyg för att nå målen. Vinnova har tio fokusområden med hållbarhet som tema, de inriktas på ämnen som till exempel industri, mobilitet, mat, samhällsbyggnad, digital omställning, ekosystem för innovativa företag och kompetensförsörjning

Mobilitet kan till exempel vara stöd till digital teknik för autonoma flygplatser.

– Vi tar ut mer än vad jorden ger. Vi vet vad vi behöver uppnå. Hållbarhet vilar på grundpelarna social, ekonomisk och ekologisk hållbarhet. Det finns så mycket man kan göra som inte har gjorts. Digitaliseringen kan bidra till hållbar omställning. Med en åldrande befolkningen måste stora insatser göras på vårdområdet. Med

precisionshälsa menar vi en förebyggande riktad hälsovård med hjälp av bland annat digital teknik. Det är ett exempel på en vision där halvledartekniken kommer att spela en stor roll.

Ett flaggskepp i Vinnovas verksamhet är ett arv från Nutek, bildandet av kompetenscentrum. Ett sådant centrum finansieras fem år i taget i samverkan med andra företag och myndigheter.

– Vi har haft ett i 20 år vid Chalmers som blev en framgångssaga. Det bildades regionala kompetenskluster för halvledare och visade att små företag kunde växa inom ramen för detta. Ett företag från Göteborg har gjort halvledarförstärkare till Googles kvantdatorer.

Stadens digitala tvilling

Nu finns 18 kompetenscentrum vid universitet och tekniska högskolor. Ett nytt projekt är ett centrum vid Chalmers (Digital Twin Cities) för att skapa en digital tvilling till en stad eller en region. Spetsforskning ska ske

inom åtta olika områden. En digital tvilling kan användas till mycket som till exempel arkitektur och stadsbyggnad. Ett övergripande syfte är att stärka Sveriges roll på området samhällsbyggnad.

Adela Saavedra Granholm pekar ut hälsa och energi som viktiga områden för framtiden där digitaliseringen kommer att bli avgörande.

– I framtidens självkörande bilar finns massor av sensorer. Då duger inte dagens kretsar som monteras i relativt stora moduler i små utrymmen i bilarna. De behöver bli mindre och mer integrerade så att det ska finnas plats för montering av flera sensorer för helt självkörande fordon. Vårt mobila telenät drar fortfarande mycket el, även fast det var värre förr. Nu har kiselkarbiden kommit och det gör en skillnad. Ett bra exempel på halvledarteknikens insats för ett hållbarare samhälle.

En stor del av Vinnovas verksamhet är internationell. Inom halvledare delfinansierar Vinnova projekt i de internationella europeiska programmen Key Digital Technologies och Eureka klusters. Vinnova har ingen egen svensk strategi specifik för halvledare utan den inkluderas i Vinnovas strategi för digital omställning. Inom sitt deltagande i de europeiska programmen Key Digital Technologies, Horisont Europa och Eureka klusters bidrar Vinnova till den europeiska strategin för halvledare, elektroniska komponenter och system i samverkan med andra europeiska länder. □

»Vi tar ut mer än vad jorden ger. Vi vet vad vi behöver uppnå. Hållbarhet vilar på grundpelarna social, ekonomisk och ekologisk hållbarhet. Det finns så mycket man kan göra som inte har gjorts.«

Sveriges halvledarekosystem

Detta svenska ekosystemet för halvledare kan delas in i en säljande och en köpande del. Den köpande delen domineras av stora företag som Ericsson, ABB, Volvo, Scania och Saab, med flera.

Det strategiska innovationsprogrammet Smartare Elektroniksystem* namnger 106 företag som arbetar inom den säljande delen av landets halvledarekosystem vilka presenteras i kartbilden.

De har också organiserat det svenska ECS-landskapet i tio strategiska områden utifrån kompetenser och styrkor:

1. Mikro- och nanoelektronik
2. Tryckt elektronik
3. Kraftelektronik
4. Fotonik
5. Antenner, mikrovågs- och terahertzteknik
6. Sensorer
7. Inbyggda system
8. Elektronikpackning
9. Tillförlitlighet
10. Avancerad produktionsteknik

Källa: RISE

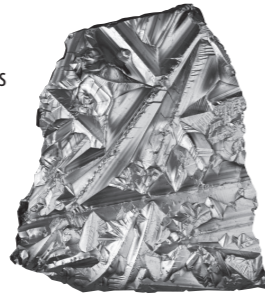


Halvledare – introduktion

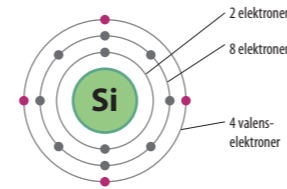
Halvledare är som namnet antyder ett material som inte är en ledare och inte heller en isolator utan har egenskaper som placerar det någonstans mitt emellan. Det kan fungera både som ledare och isolator beroende på hur man styr dess elektroniska egenskaper.

Typiskt för halvledarmaterial (grönt) är att de återfinns i närheten av grupp fjorton, eller IV-A (4-A) enligt det äldre benämningen för periodiska systemets gruppindelning. I denna grupp återfinns exempelvis Germanium (Ge) – som användes mycket när de första transistorerna utvecklades under 1950-talet.

Det absolut vanligaste halvledarmaterialet är idag kisel (Si) – också grupp IV-A – som man hittar i stort sett all vardagselektronik.



Rent kristallint kisel

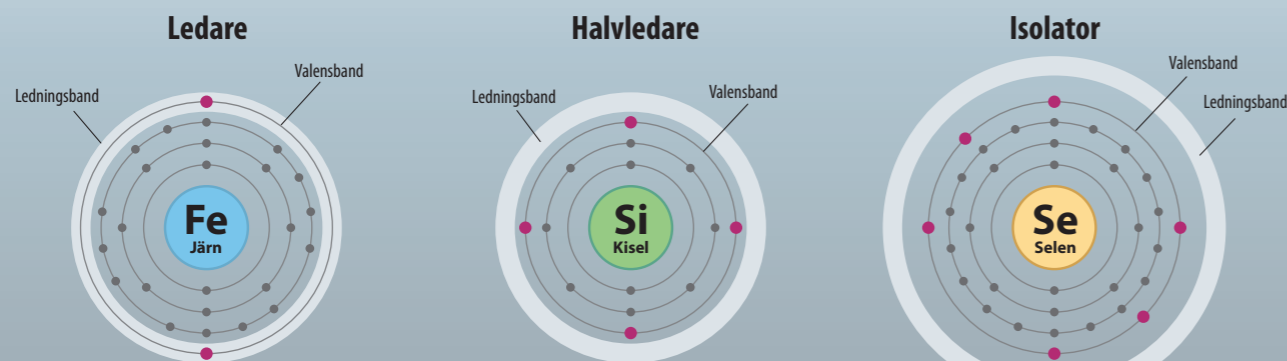


Kisel - elektronkonfiguration

Grupper	Metaller										Halvmetaller						Isolatorer															
	Alkalimetaller		Alkaliska jordmetaller		Övergångsmetaller		Övriga metaller		Halvmetaller		Icke metaller		Övriga icke metaller		Halogener		Ädelgaser		III-A		IV-A		V-A		VI-A		VII-A		VIII-A			
1	I-A		II-A		III-B		IV-B		V-B		VI-B		VII-B		VIII-B		I-B		II-B		III-A		IV-A		V-A		VI-A		VII-A		VIII-A	
1	H	He																			B	C	N	O	F	Ne						
2	Li	Be																			Al	Si	P	S	Cl	Ar						
3	Na	Mg																			Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr			In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
7	Fr	Ra	Ac																													

Halvledare leder "nästan" ström

Valensbandet är det skal där en atoms yttersta elektroner befinner sig medan ledningsbandet är benämningen på de energinivåer hos elektroner i en kristall som gör att elektronerna kan röra sig fritt i materialet. Halvledarmaterialens förmåga att leda elektricitet på ett "halventusiastiskt" sätt är alltså kopplat till den energi som krävs för att få dess valenselektroner att bli ledningselektroner. Den eventuella ledningsförmågan blir dock relevant endast när man har många atomer i en kristallstruktur. Bilderna visar principen hos enskilda atomer.



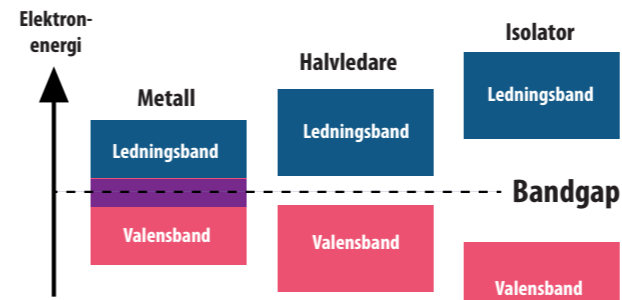
Hos en metall som järn överlappar ledningsbandet och valensbandet varandra. Valenselektronerna i kan röra sig fritt i materialet och därmed leda elektricitet.

I ett halvledarmaterial som kisel befinner sig ledningsbandet på ett litet avstånd från valenselektronerna och kisel är på gränsen till att leda elektricitet. Genom att tillföra energi eller att manipulera kiselkristallens kemi genom en process som kallas dopning kan dess ledande egenskaper styras och förändras.

Hos isolerande ämnen befinner sig ledningsbandet på ett större avstånd från valensbandet. Det krävs mycket höga energinivåer för att materialet ska förmås att leda elektricitet.

Det viktiga bandgapet

Bandgap är ett återkommande begrepp när man talar om halvledare. Definitionen bandgap anger avståndet mellan ledningsbandets botten och valensbandets topp. För metaller är denna skillnad som sagt noll – banden överlappar varandra och metaller leder ström.



Halvledarmaterial har ju ett litet bandgap och det är just denna förmåga att vara på gränsen till att leda ström som gör materialet så lämpligt för tillverkning av olika typer av elektroniska komponenter.

pn-övergångar

Mycket av hemligheten med hur halvledarkomponenter fungerar ligger i dopningsprocessen. Genom att tillföra små mängder av olika främmande grundämnen till två olika bitar absolut rent kisel får man två kiselkristaller med skilda egenskaper. De leder båda ström bra men på olika sätt. Den ena typen kallas p-dopat kisel då dess laddningsbärare är positivt laddade, den andra typen n-dopat kisel då dess laddningsbärare har negativ laddning.

Sätter man ihop dessa två kiseltyper får man en pn-övergång. I gränssnittet skapas ett så kallat spärrskikt, en övergång från en typ av ledningsförmåga till en annan.

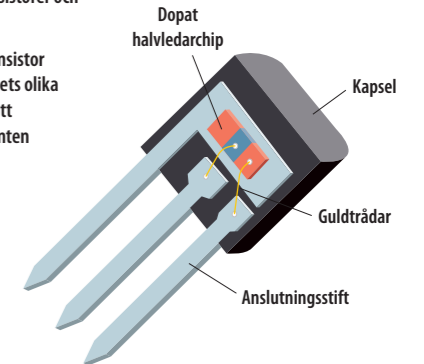
Det är förmågan att utnyttja och manipulera dessa pn-övergångar och spärrskikt som öppnar vägen för otaliga halvledartillämpningar. Hur en pn-övergång kan användas beskrivs på sidorna 72–73 och 89.

Dopning

Ett annat centralt begrepp är dopning. Rent kisel leder inte ström under normala förhållanden.

Ett sätt att få kisel att leda ström är att förorena den rena kiselkristallen med andra grundämnen. Att på detta sätt "dopa" kisel med andra grundämnen gör också att kisel leder elektricitet på något olika sätt. Detta är väldigt gynnsamt när man ska bygga transistorer och andra halvledarkomponenter.

I hjärtat av en enskild (diskret) transistor sitter en flisa kisel (chip). Kiselchipets olika delar är dopade på skilda sätt för att kunna utföra det arbete komponenten är avsedd för. Regionerna är också förbundna med guldtråd till anslutningsstift för att kunna lödas fast med andra komponenter på ett moderkort. Allt tillsammans är sedan kapslat i epoxi för skydd och för att avleda värme.



När inte kisel räcker till

Även om kisel är bra på att lösa de flesta arbetsuppgifterna behövs ibland andra halvledarmaterial – till exempel vid höga temperaturer, höga spänningar eller om något ska utföras i mycket höga datatakt. Från början användes ett fåtal grundämnen vid halvledartillverkning, idag stora delar av periodiska systemet.

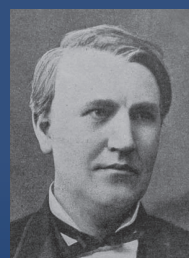
III-V - material

III-V-material (läses 3/5-material) är sammansatta halvledarmaterial och består av två eller flera grundämnen från grupperna III-A och V-A i periodiska systemet.* De är dyrare än kisel men blir allt vanligare inom RF-teknologi och kraftelektronik. Några av de viktigaste III/V-materialen presenteras på sidorna 16–17 och sidan 19.

* III-V-material (läses 3/5-material) har fått sina namn efter det äldre sättet att namnge periodiska systemets grupper med romerska siffror. Idag används också numrering med de arabiska siffrorna 1–18.

Halvledarens förhistoria

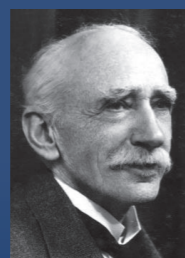
Transistorer är som elektriska ventiler eller strömbrytare som går att stänga och öppna. Men de kan också kopiera en liten elektrisk ström till en starkare. För att förstå en transistors funktion kan man titta på dess föregångare elektronröret. Men transistorens historia började egentligen med en sotande glödlampa.



Thomas Edison

1879 – Glödlampans princip

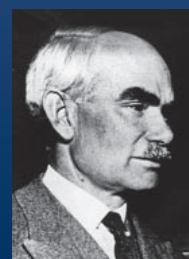
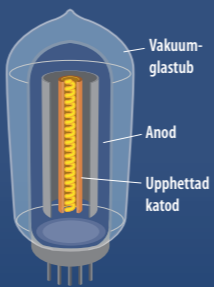
Thomas Edisons nyuppfunna glödlampa hade en tendens att bilda sot när den lyste. Han testade att koppla en metallskärm i lampans glödlampskärm och anslöt den till den positiva sidan av batteriet. En enkelriktad elektronström flödade från glödlampstråden genom det tomma utrymmet, ett fenomen Edison inte riktigt förstod betydelsen av.



John Ambrose Fleming

1904 – Rördioden

John A Fleming utvecklade Edisons elektriska "envägsventil" för att omvandla och rikta en inkommande högfrekvent radiosignal till en lågfrekvent elektrisk signal som kunde alstra ljud. Flemingventilen är ihågkommen som den första riktiga elektroniska komponenten – rördioden – och kom till användning i de första radioapparaterna.



Lee de Forest

1907 – Rörtrioden

Lee de Forest patenterar en variant av Flemingröret. Forests innovation var att införa en tredje elektrod, styrgalleret, mellan katoden och anoden i den tidigare uppfunna dioden. Trioden kunde användas för att förstärka elektriska signaler.

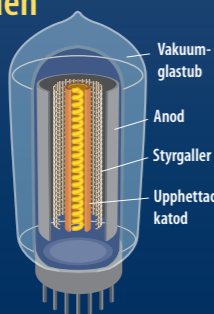


Bild på rördiod och rörtriod utgår från illustrationer av Wikipedia-användaren Sujo.

1920-tal – Telefonins- och radions genombrott

Tidigare hade de förstärkta telefonsignalerna bara tillåtit samtal över avstånd som motsvarade sträckan mellan New York och Denver i USA. Under 1920-talet kunde man med rörtriodes hjälp snart tala med varandra över hela kontinenten och så småningom över hela jordklotet.



De tidiga radioapparaternas svaga utsignal kunde endast uppfattas med hörlurar. Med rörtrioden kunde signalen förstärkas till en högtalare.

Rörtriodes princip

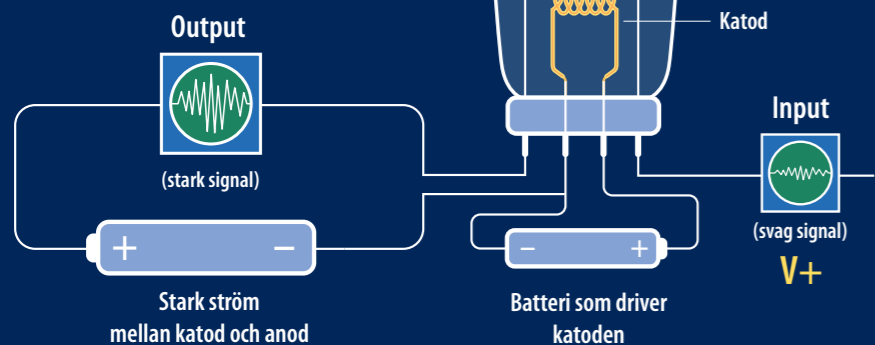
Rörtrioden är en föregångare till transistor och kan utföra samma uppgifter, det vill säga förstärka elektriska signaler eller fungera som en snabb (för sin tid) elektronisk brytare, en egenskap som så småningom kom att användas i de första datorerna.

Rörtrioden består av tre delar, anod, styrgaller och katod.

En ström passerar genom katoden som börjar värmas upp, vilket gör att den frigör elektroner. Eftersom det är vakuum i rörtrioden har elektronerna mycket lite motstånd och de attraheras av den positivt laddade anoden. Detta sluter kretsen för batteriet med stark ström som har sin minuspol ansluten till katoden. Den starka strömmen tillåts nu flyta mellan katod och anod.

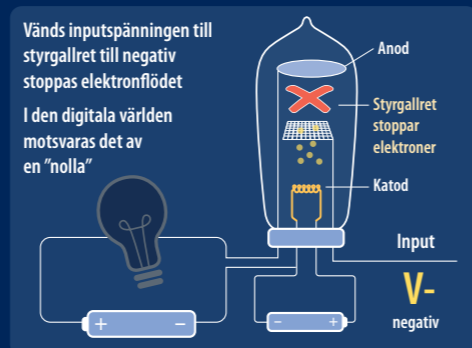
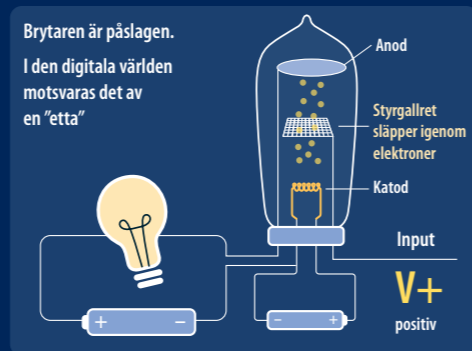
Vi kan manipulera flödet av elektroner med hjälp av styrgalleret.

Skickar vi in en svag positivt laddad signal (exempelvis en röst) via styrgalleret så kopieras och förstärks den av det starka, strömmande flödet av elektroner mellan katoden och anoden. En svag "inputsignal" omvandlas alltså till en stark "outputsignal". Rörtrioden fungerar som en förstärkare.



Rörtrioden som strömbrytare

Om vi istället kopplar en ljuskälla till det batteriet med starkare ström så lyser det så länge inputsignalen till styrgalleret är positiv och släpper igenom elektroner.

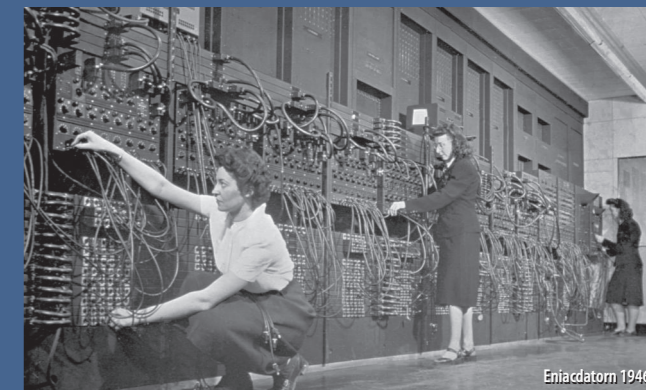


1940-tal – De första datorerna

Under kriget byggdes Colossus i Storbritannien för att avkoda Tysklands enkrypterade meddelanden. Tillsammans med Eniac-datorn i USA var de exempel på tidiga datorer som använde de mycket snabbare vakuumpörren som reläer. Eniac-datorn använde 18 000 rör och vägde 30 ton.

På Bell Laboratories i New York satt forskningschefen Mervin Kelly och funderade på problemen med vakuumpörren. De var stora, drog mycket energi och hade en begränsad livslängd. Kelly kom på att experimentera med halvledande material som kisel och germanium.

Inspirationen fick han av de halvledande kristallmaterial som hade börjat användas inom den radarteknik som införts under kriget.



Eniacdatorn 1946

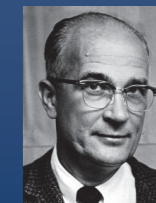
1947 – första transistor

Mervin Kelly sätter ihop ett dreamteam bestående av tre begåvade men sinsemellan väldigt olika personligheter som jobbar intensivt under två år på Bell Laboratories under ledning av William Shockley.

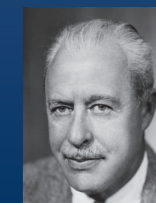
Under ett experimenttillfälle i december 1947 får forskarna John Bardeen och Walter Brattain plötsligt en så kallad punkt-kontaktstransistor att fungera. William Shockley är inte närvarande under experimenttillfället och blir till slut utelämnad när patentet skrivs.



Punkt-kontaktstransistor



William Shockley



Walter Brattain



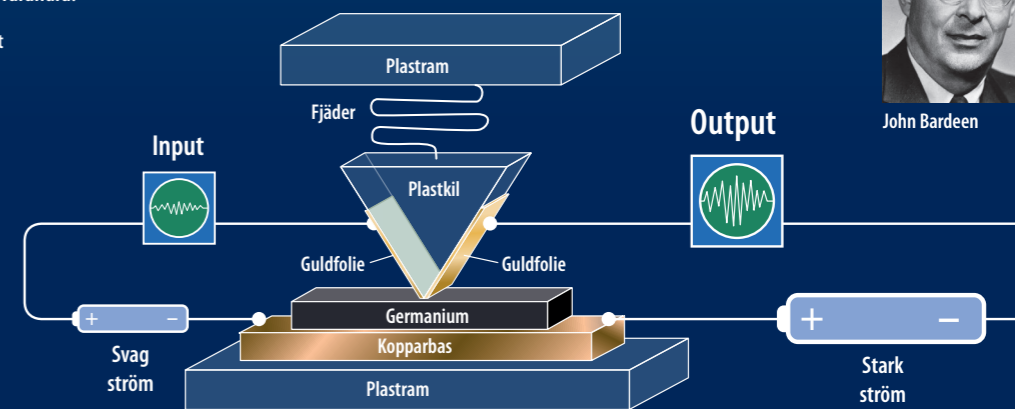
John Bardeen

Punkt-kontaktstransistor

Brattain fäste en liten remsa av guldfolie över spetsen på en plastkil. Han skar sedan försiktigt igenom guldets vid spetsen av triangeln vilket gav två elektriskt isolerade guldkontakter mycket nära varandra.

Den guldklädda kilen pressades mot en bit dopat germanium med hjälp av en fjäder. När en svag elektrisk signal reste igenom den vänstra guldfolien så flöt en del elektronerna genom germaniumet under kilens spets och triggade igång den starka strömkällan via den högra guldfolien. Samtidigt kopierades signalen från den svaga strömkällan.

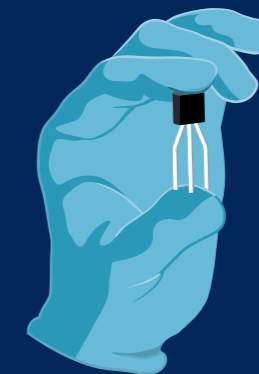
Punkt-kontaktstransistor kunde göra samma sak som en rörtriod – det vill säga kopiera och förstärka en svag elektronisk signal eller fungera som en elektronisk strömbrytare.



BJT-transistor

William Shockley kunde dock inte smälta att han inte varit direkt involverad i att få punkt-kontaktstransistor att fungera. Under en intensiv månad 1948 formulerar han funktionen för en helt ny transistortyp, BJT-transistor *Bipolar Junction Transistor*.

BJT:s är robustare, har en tvådimensionell design och dyker snart upp i vardags elektronik under 50-talet. BJT-transistor används sedan i mini- och stor-datorer de närmaste decennierna fram till att MOSFET- och CMOS-teknologin slår igenom under 1980-talet.



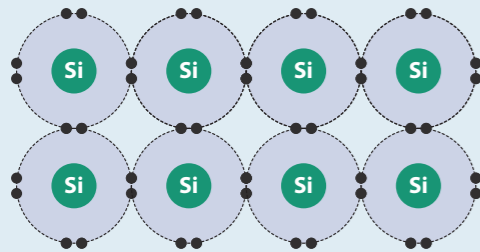
Till vänster ses en diskret (enskild) BJT-transistor. BJT-transistorer i nanoskala används även i dagens integrerade kretsar som spänningsreferens för bandgap, som temperatursensorer eller för att hantera elektrostatisk urladdning.

BJT-transistorers funktion förklaras ingående på sidorna 90–91.

Dopning och vägen till transistorn

När man använder ett triodelektronrör som vi beskrev i föregående illustration så är det styrgallret som styr elektronernas flöde. För att få en transistor att göra samma konst måste man börja med att manipulera det rena kiset. Det görs genom att tillföra föreningar av andra grundämnen i mycket små mängder – så kallad dopning.

Rent kisel är en dålig ledare...



När rent kisel svalnar och övergår i fast form kristallerar ämnet så en kiselatom binds till fyra andra kiselatomer. Det bildas en stabil kristall med 8 elektroner i respektive atoms yttersta skal.

Rent kisel har inga fria elektroner och på grund av detta är dess ledningsförmåga låg.

...men dopat kisel leder ström

Men när du injicerar en förening med fler elektroner i sitt yttersta skal in i den rena kiselkristallen, ökar ledningsförmågan hos det resulterande materialet dramatiskt.

Man kan också injicera föreningar med färre elektroner i sitt yttersta skal i kiselkristallen vilket också ökar ledningsförmågan.

Kisel

4 elektroner i yttersta skalet

Bor

3 elektroner i yttersta skalet

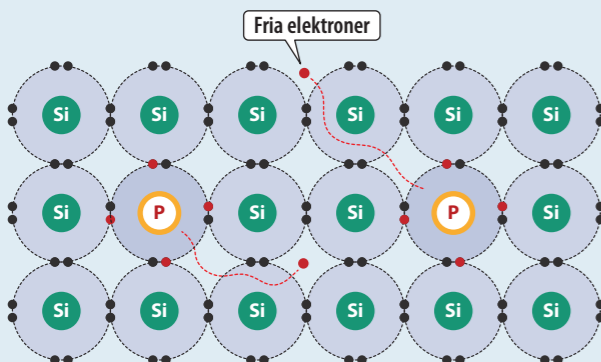
Fosfor

5 elektroner i yttersta skalet

III-A	IV A	V-A
13	14	15
B Bor 2-3	C Kol 2-4	N Kväve 2-5
Al Aluminium 2-8-3	Si Kisel 2-8-4	P Fosfor 2-8-5
Ga Gallium 2-8-18-3	Ge Germanium 2-8-18-4	As Arsenik 2-8-18-5
In Indium 2-8-18-18-3	Sn Tenn 2-8-18-18-4	Sb Antimon 2-8-18-18-5
Tl Tallium 2-8-18-32-18-3	Pb Bly 2-8-18-32-18-4	Bi Vismut 2-8-18-32-18-5

n-dopning $-$ – en negativ laddningsbärare

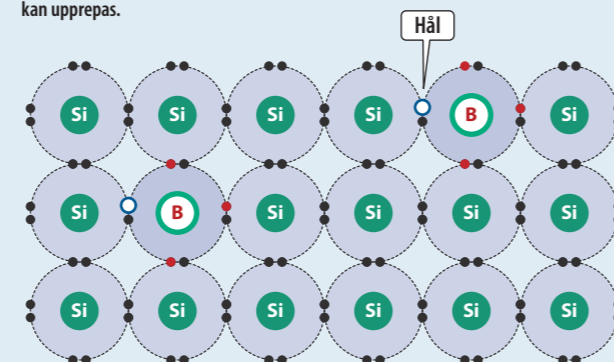
Om man till rent kisel tillsätter små mängder av ett ämne från grupp V-A (grupp 5) i det periodiska systemet som exempelvis fosfor så förändras materialet. Fosfor har 5 elektroner i det yttersta skalet och den tidigare stabila kiselkristallen får nu en mängd extra elektroner som kan röra sig fritt.



Kopplar man ett batteri över kristallen kommer den att leda ström bra. Det är elektroner som bär upp strömmen och elektroner är ju negativt laddade. Det gör att materialet nu är en ledare för negativa laddningsbärare eller n-ledare.

p-dopning $+$ – en positiv laddningsbärare

Om man till det rena kiset istället tillsätter ett ämne från grupp III-A (grupp 3), exempelvis bor som endast har tre elektroner i det yttersta skalet, så saknas det istället elektroner i den tidigare symmetriska strukturen. Bristen på elektroner kallas hål och effekten blir att en elektron från en närliggande kiselatom lätt kan hoppa över och fylla hålet. Då uppstår ett nytt hål och det hela kan upprepas.

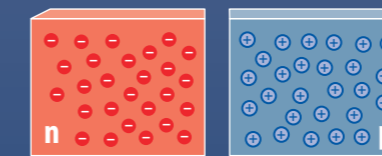


Även ett p-dopat material leder ström bra. De uppkomna hålen och bristen på elektroner kan ses som en positiv laddning och materialet är nu en ledare för positiva laddningsbärare eller p-ledare.

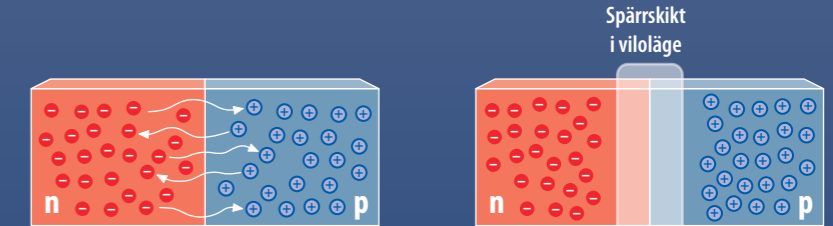
Dioden – halva vägen till BJT-transistorn

Vad händer om man sätter samman en bit n-ledande kisel med en bit som är p-ledande? Jo, man får en diod. En viktig halvledarkomponent som exempelvis kan rikta elektroniska strömmar eller omvandla växelström till likström. Att förstå diodens funktion är också halva resan till att förstå hur en BJT-transistor fungerar.

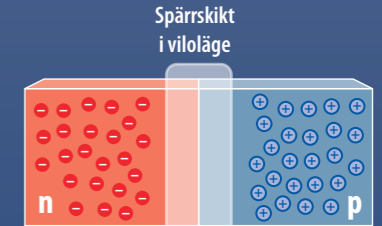
Det viktiga spärrskiktet



Vi vet att laddningar av olika slag dras till varandra och att laddningar av samma slag stöter bort varandra. Innan de n- och p-dopade bitarna sätts samman är de respektive laddningsbärarna jämt fördelade i både n-materialet och p-materialet.

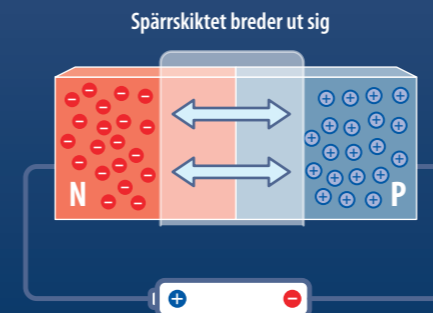


Men när vi sätter ihop bitarna vandrar de fria elektronerna från n-sidan över mot p-sidans hål och fyller ut dessa. Samtidigt vandrar p-sidans hål över till n-sidan där dom träffar på elektroner som fyller hålen.

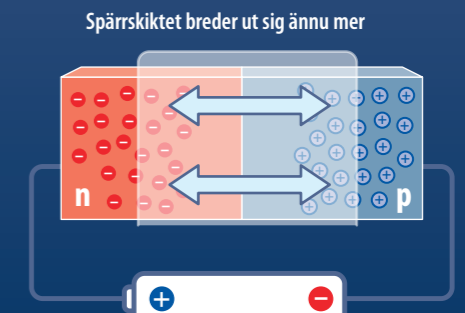


Resultatet blir ett område kring skarven mellan n- och p-områdena som inte har några laddningsbärare. Området kallas spärrskikt och vi har en diod.

Backspänd diod Vi ansluter n-området till ett batteris pluspol och p-området till minuspolen

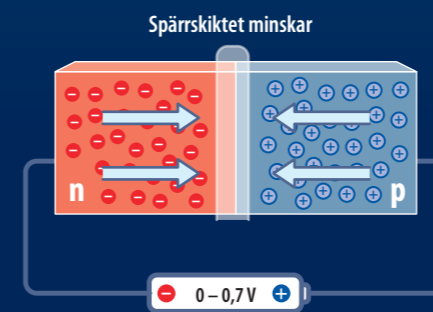


Med batteriet vänt i denna riktning dras de negativa laddningsbärarna i n-området mot batteriets pluspol och hålen från p-området till batteriets minuspol. Dioden är backspänd och kan inte leda ström.

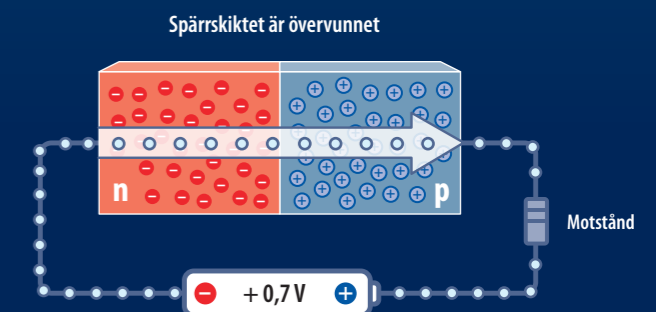


Ökar vi spänningen blir resultatet ännu tydligare. Spärrskiktet blir alltså ännu större jämfört med hur det var i diodens viloläge.

Framspänd diod Vad händer om vi vänder på batteriet?



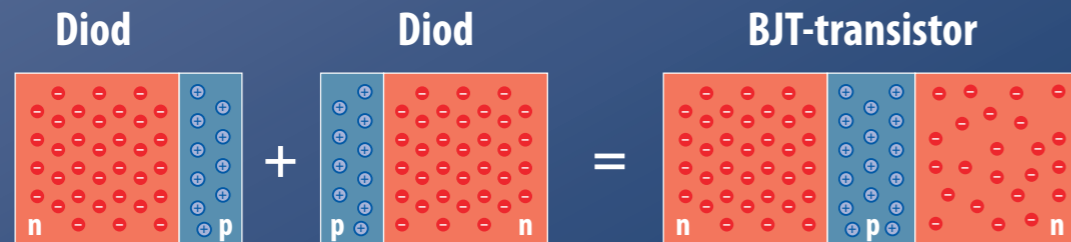
Hål från batteriets pluspol fylls nu på i p-materialet och elektroner från batteriets minuspol fylls på till n-materialet. Ökar man spänningen steglöst och långsamt från 0 volt och uppåt så krymper spärrskiktet gradvis ihop.



Vid cirka 0,7 volt (gäller kiselkomponenter) är spärrskiktet helt övervunnet och dioden kan leda ström. När dioden väl börjar leda ström så gör den det rejält. Därför måste man ansluta ett motstånd som begränsare för att förhindra att dioden går sönder.

Vägen till BJT-transistorn – del 2

De första kommersiella transistorerna var så kallade BJT-transistorer (Bipolar junction transistor). De används fortfarande bland annat till förstärkning av signaler och sensorer i integrerade kretsar. Specialiserade typer används som radiofrekvensförstärkare eller för omkoppling av högeffektsströmmar.



En BJT-transistor kan liknas vid två dioder som sätts samman med p-ledarna mot varandra.

n-ledaren till vänster är starkt dopad. p-ledaren är svagare dopad. n-ledaren till höger är ännu svagare dopad.

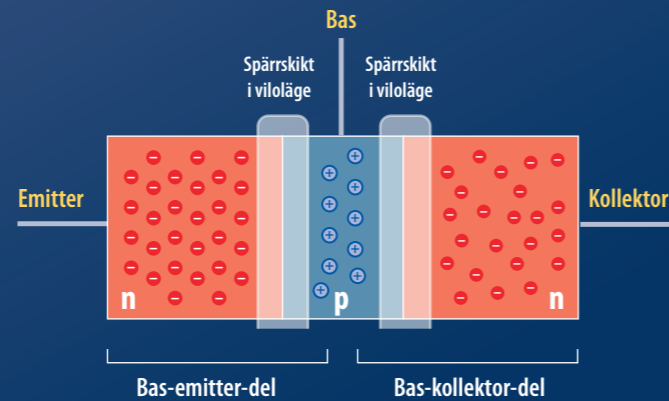
BJT-transistorn

Vi sätter dit anslutningar till de tre ledande områden och kallar dessa:

- **Emitter (sändare)**
- **Bas**
- **Kollektor (mottagare)**

Precis som hos en diod så skapas vilande spärrskikt vid pn-övergångarna.

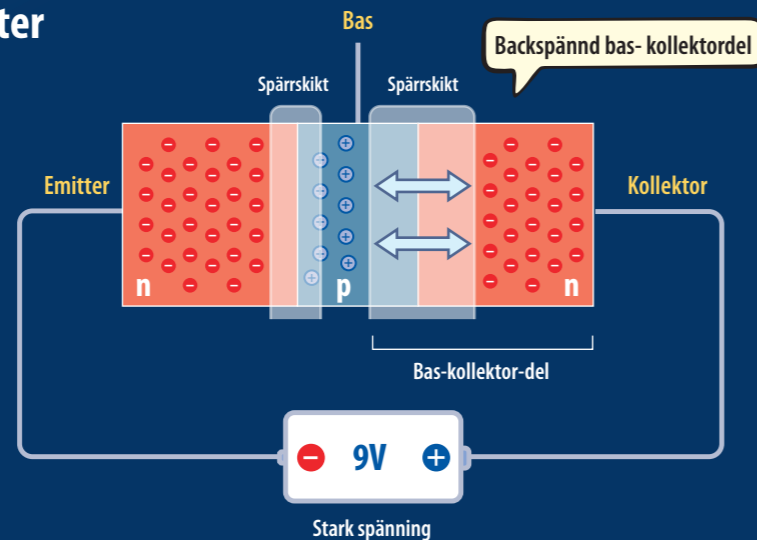
I själva verket är det ju som två dioder som kopplats ihop, vi kallar dessa bas-emitter-del och bas-kollektor-del



Vad händer om vi ansluter hög spänning?

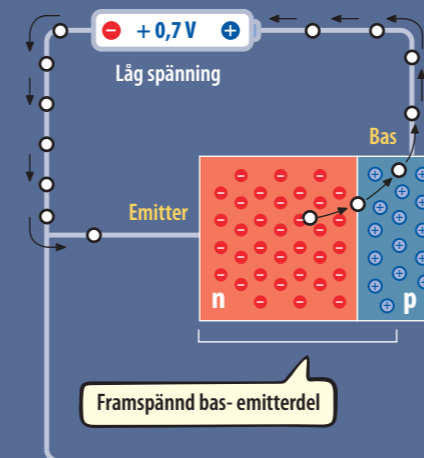
Svaret är ingenting!

Batteriet drar negativa laddningsbärarna i n-området mot batteriets pluspol så vi får en backspänd pn-övergång i bas-kollektor-delen.

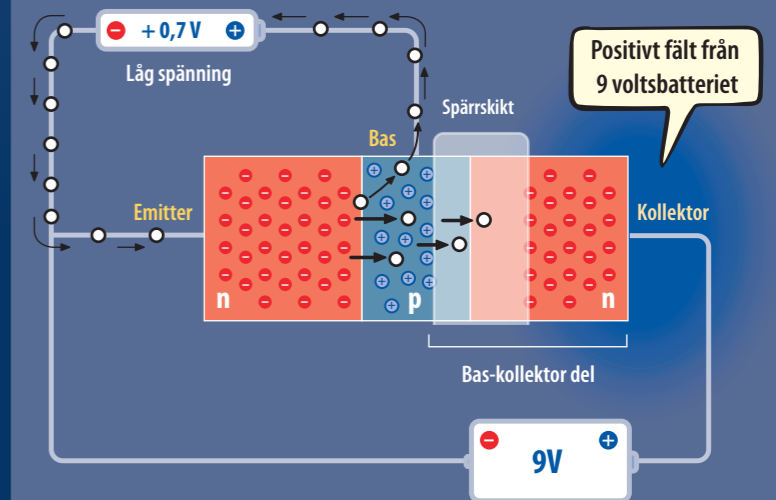


Vi ansluter en låg spänning över bas- emitterdelen

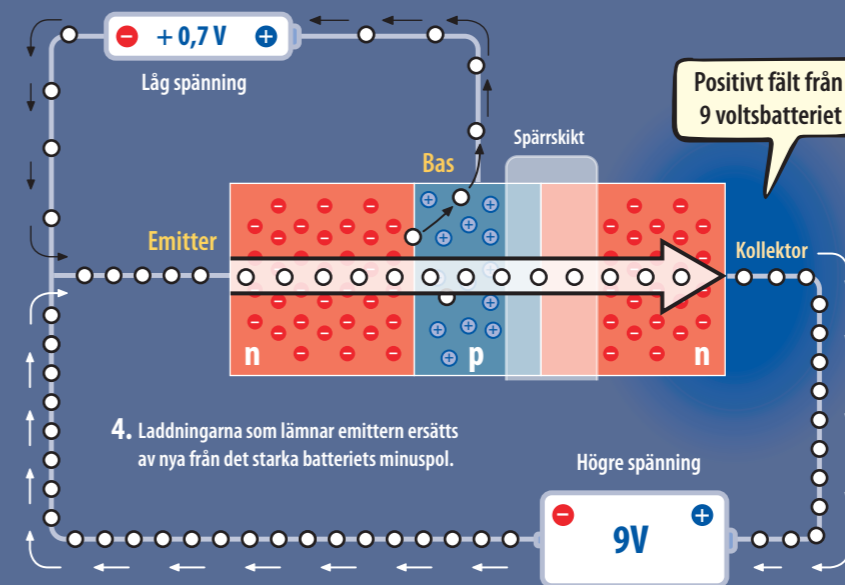
1. Bas-emitter-delen är framspänd. Ökar batterispänningen och stiger över 0,7 volt börjar negativa laddningar i emittorn röra sig mot basen, attraherade av positiva laddningar från batteriet med den lägre spänningen.



2. När de negativa laddningsbärarna når fram till basen känner en del av dem den höga spänningen från 9 voltsbatteriets pluspol som är ansluten till kollektorn och som skapar ett kraftigt fält.



3. Kollektorspänningen övervinner spärrskiktet och drar till sig laddningarna från emittorn som passerar basen i hög hastighet. När de väl kommer fram till kollektorn fortsätter de sedan sin resa bort till det starka batteriets pluspol.



5. Det är relativt få positiva laddningsbärare i basen som attraherar de negativa laddningsbärarna från emittorn. Men utan dessa positiva laddningsbärare hade ingenting hänt.

De flesta laddningarna från emittorn passerar med full fart basen och går till kollektorn, men en på cirka 100 laddningar träffar på ett nytt hål i basen och håller det lilla batteriet igång.

Med en svag kraftkälla kan alltså en mycket stark kraftkälla regleras eller helt stängas av och på. Det hela kan liknas vid en vattendamm där en liten kraft höjer och sänker dammluckan för att kontrollera den fulla kraften i den lagrade vattenreservoaren.



MOSFET-transistorn

Under början av 1980-talet började en ny processorteknologi ersätta BJT-transistorn. MOSFET-transistorn (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) är den underliggande teknologin för dagens digitala logik, integrerade kretsar, tunnfilms-transistorer som LCD-skärmar och även högspänningselektronik. Med över 13 000 000 000 000 000 000 enheter är transistortypen det mest tillverkade föremålet i mänsklighetens historia.

Fyra terminaler

Till skillnad från en BJT-transistors tre terminaler så har en MOSFET fyra terminaler med något annorlunda namn.

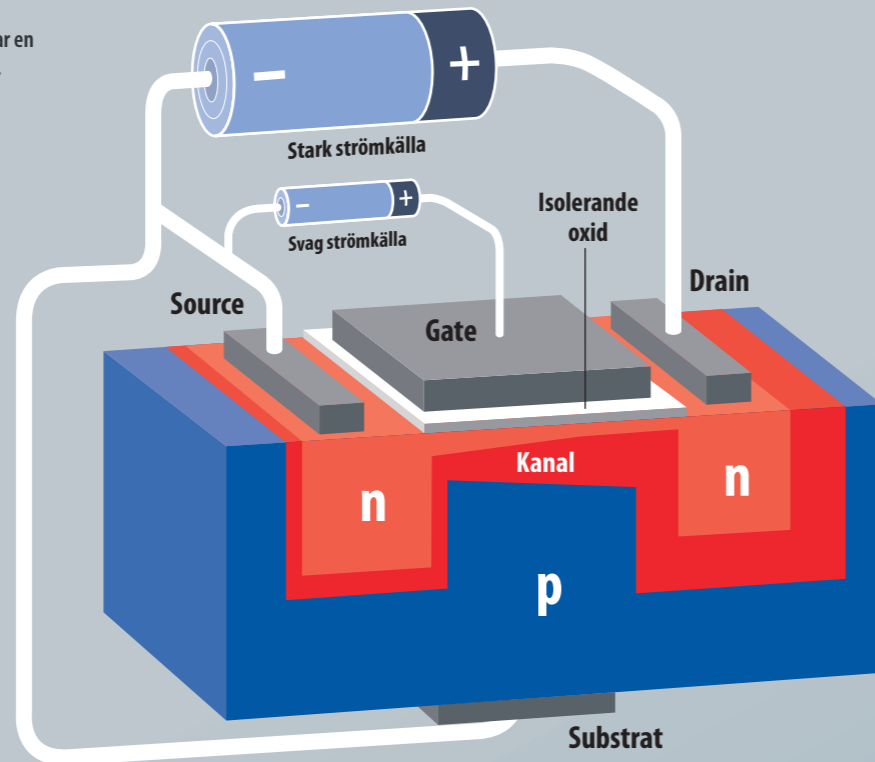
- Source (källa)
- Drain (mottagare)
- Gate (grind)
- Substrat

Gaten är dessutom isolerad från kiselsubstratet med ett tunt lager oxid.

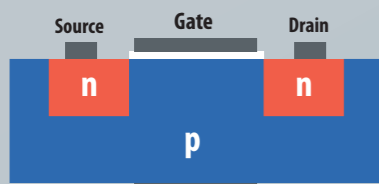
Här är det gaten som styr

Hos en BJT-transistor har den svaga strömkällan som uppgift att locka med sig elektroner för att på så sätt få den starka strömkällan att övervinna ett spärrskikt.

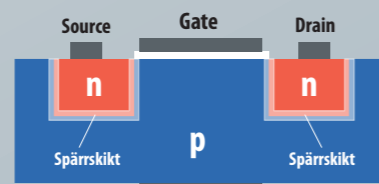
Hos en MOSFET styr en mycket svag strömkälla istället en "gate" som öppnar en kanal mellan source och drain vilket får den starka strömkällan att flöda. MOSFET-transistorn är till skillnad från BJT-transistorn spänningsstyrd, det går i stort sett ingen ström alls genom gaten vilket gör den energisnål.



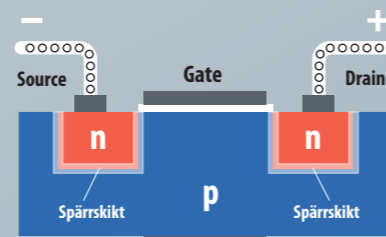
Så fungerar MOSFET



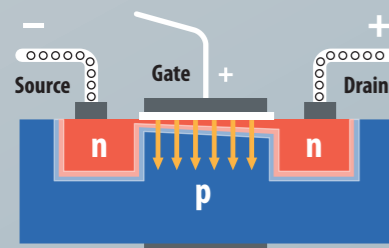
Liksom hos en BJT-transistor används två typer av dopat kisel. Vanligen n-dopat kisel för source och drain som ska leda den starka strömmen. Dessa ligger närbäddade i en bit p-dopat kisel som skiljer de båda åt.



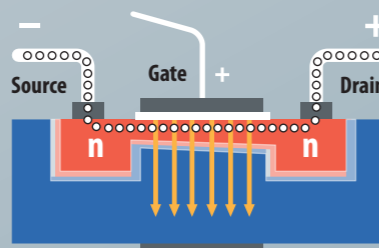
Och precis som hos en BJT-transistor eller en diod uppstår spärrskikt i övergångarna mellan de n-dopade och p-dopade kiselmaterialen.



Kopplar vi en stark strömkälla mellan source och drain så händer inget. Spärrskikten förhindrar strömmen att flöda fritt. Transistorn är avstängd eller i noll-läge.



Lägger vi på en mycket svag positiv spänning på gaten kommer den positiva laddningen generera ett elektriskt fält. På grund av elektronförskjutningen så skapas ett nytt spärrskikt mellan de båda n-dopade delarna.



När gatespänningen är tillräckligt stark så öppnas kanalen helt och den starka spänningen mellan source och drain kan strömma fritt. Transistorn är påslagen eller i det läge som representerar en digital etta.

Fördelar med MOSFET

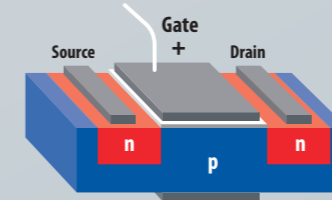
- Mycket låg gateström
- Lågt brus
- Hög kopplingshastighet
- Lätta att miniaturisera
- Plan tillverkningsprocess

MOSFET-typer

MOSFETS tillverkas i olika konfigurationer beroende på vad de ska användas till.

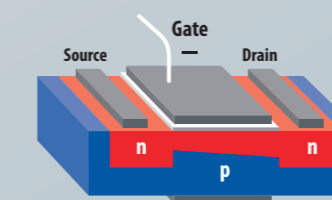
Enhancement eller depletion MOSFET

Enhancement MOSFET



I normalfallet är kanalen helt strypt när det inte finns någon spänning på gaten. Det kallas för en enhancement mode MOSFET. En positiv spänning krävs över gate för att kanalen ska öppnas.

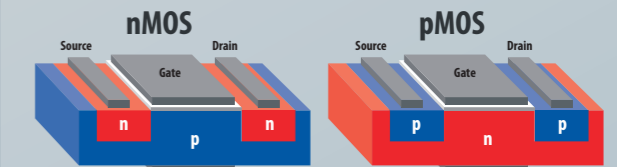
Depletion MOSFET



Men om en MOSFET förses med en sträng av material mellan source och drain som är dopat på samma sätt kommer den att leda ström även om gate är spänningslös. En sådan transistor kallas för depletion mode MOSFET. I det fall det behöver gate ha en negativ spänning för att transistor ska stängas.

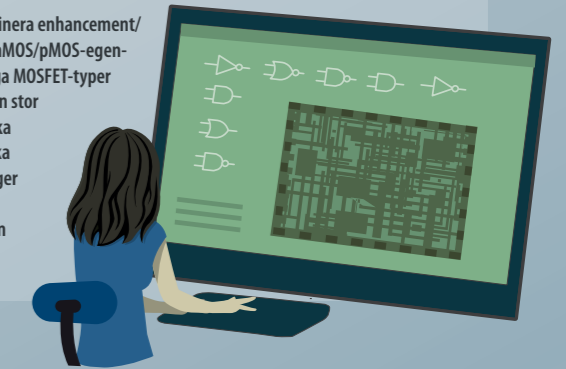
p- eller n-dopade MOSFET

En MOSFET-transistor kan antingen byggas med n-dopad source och gate med p-dopad kanal eller med p-dopad source och gate med n-dopad kanal. Det förstnämnda benämns nMOS och det sistnämnda pMOS.



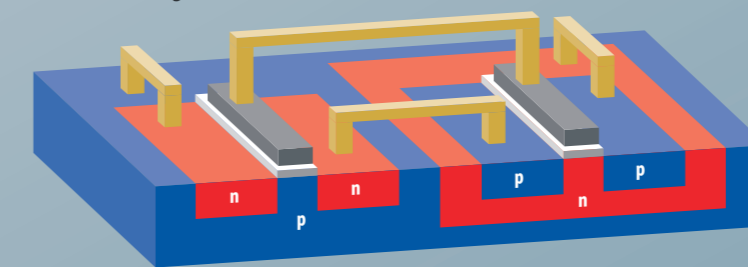
I nMOS är gatespänningen positiv vilket gör att kanalen blir negativt laddad medan i pMOS är det tvärtom. Eftersom fria elektroner har högre rörlighet än hål är nMOS mer effektivare och vanligast.

Genom att kombinera enhancement/depletion- med nMOS/pMOS-egenskaper kan många MOSFET-typer erhållas. Det är en stor fördel när man ska designa de logiska grindar som bygger upp integrerade kretsar och annan elektronik.



CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

Eftersom strömåtgång och värme är de största problemen i design av integrerade kretsar, har CMOS blivit den dominerande designen för logiska grindar. I CMOS-logik används komplementära par av nMOS- och pMOS-transistorer som balanserar ut spänningen mellan varandra. Genom att göra så används ström endast kortvarigt när man växlar mellan på och av. CMOS-logik förbrukar över 7 gånger mindre ström än nMOS-logik och cirka 100 000 gånger mindre ström än BJT-transistor-logik.

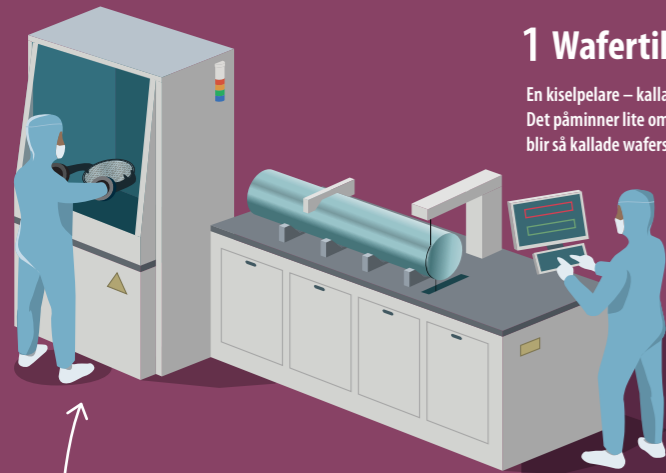


CMOS har många användningsområden



Tillverkning av halvledarchip

Kisel används till över 90 procent av alla världens halvledarkomponenter. Dessa tillverkas i specialiserade fabriker som kostar hundratals miljarder kronor att bygga. Den idag vanligaste transistorkonstruktionen är yttransistorn (planartransistorn). Den kan tillverkas billigt genom att man med fotolitografi, etsning och dopingprocesser steg för steg framställer hundratals datachip ur en och samma kiselplatta (wafer). Varje datachip kan i sin tur innehålla flera miljarder transistorer.



1 Wafertillverkning

En kiselpelare – kallad göt – dras upp ur en smälta av nästan 100-procentigt rent kisel. Det påminner lite om tekniken att stöpa ett ljus. Kiselgöten sågas till tunna skivor och blir så kallade wafers – de substrat som halvledarkomponenterna sedan tillverkas på.

Epitaxi är ordnad tillväxt av ett kristallint material på ett annat kristallint substrat. Det ger möjlighet att kontrollera kristallstrukturen och den kemiska sammansättningen. Processen sker i speciella reaktorer under höga temperaturer där tillväxtmaterialet förångas för att sedan fästa på värdsustratet.

2 Polering

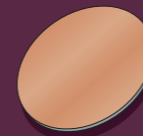
Wafern poleras noggrant för att avlägsna repor och orenheter. En wafer är normalt 400–600 mm i diameter och 2 mm tjock.



Steg 3–8 upprepas sedan 20–30 gånger för att bygga upp de komplexa lager av isoleande oxidskikt, dopade områden och andra material som krävs för kretsdesignen.

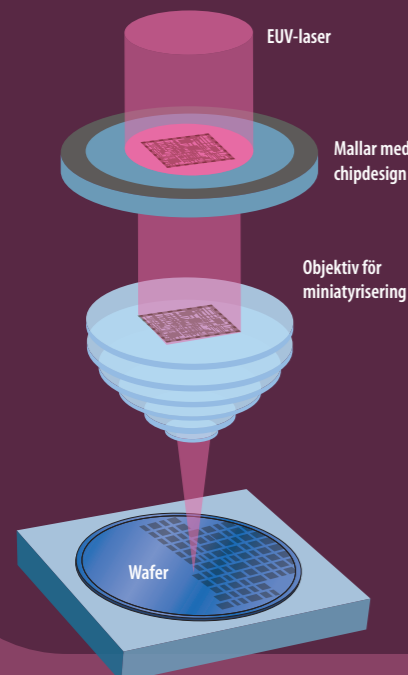
3 Materiallager

Ett tunt materiallager läggs på wafern. Det kan vara ett isolerande oxidskikt eller ett ledande materialskikt.



5 Litografi

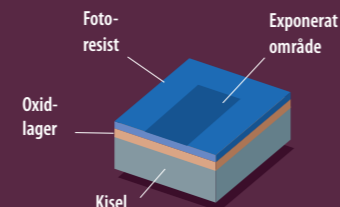
De minsta kommersiella transistorerna har en gestorlek på endast 5 nanometer. Det motsvarar 50 atomer på rad. En litografmaskin med den precisionen arbetar med EUV-laser (Extreme Ultraviolet Lithography). Annat ljus har för stora våglängder för att klara jobbet.



Wafren exponeras för laserljus genom en fotomask i speciella exponeringsmaskiner som kallas steppers. Under denna process används chipmallar som kallas rectakhals för att steg för steg överföra de mycket komplexa geometriska mönstren i kretsdesignen till kiselkivan.

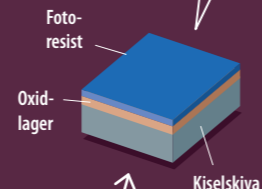
4 Fotoresist

Över lagret med oxid läggs ett lager fotoresist – ett ljuskänsligt material som ligger till grund för nästa steg.



Det exponerade området av chipmönstret markerar materialskiktet som ska friläggas. Den oexponerade delen förblir som den är och ska skydda skiktet.

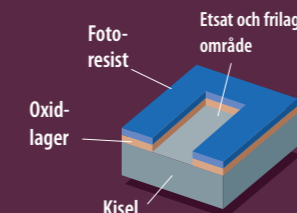
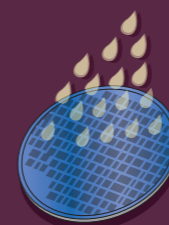
Enskild transistor



Observera att kuberna visar tillverkningsstegen för en enda enskild transistor. En wafer kan rymma allt från några hundratals till många miljarder transistorer beroende på användningsområde. De minsta är bara några miljondels milimeter stora.

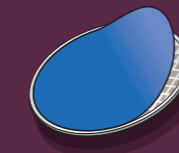
6 Etsning

Därefter etsas det exponerade lagret av oxid bort i de områden som belysts under det föregående steget.

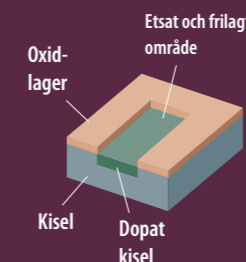


Upprepa några tiotal gånger...

8 Fotoresisten avlägsnas



Fotoresisten avlägsnas, en processcykel är fullbordad och det första lagret av chipdesignen tillverkad.

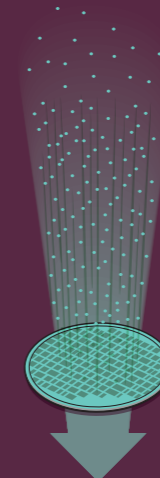


Oxid-lager
Etsat och frilagt område
Kisel
Dopat kisel

7 Doping

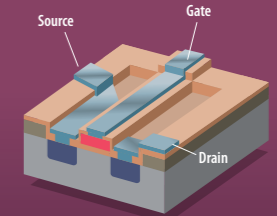
Vid behov tvingas nya material som bor eller fosfor in i det frilagda området genom jonbombardemang i en process som kallas doping.

Resistmaterialet blockerar dopämnena från att komma in i områden där de inte är avsedda att vara.



Färdig tillverkningscykel

Så här kan en enskild MOSFET-transistor se ut när den genomgått en fullbordad tillverkningscykel. Ett tunt lager av metall läggs på och etsas till små kontakter för att kunna koppla ihop de enskilda transistorerna med varandra.

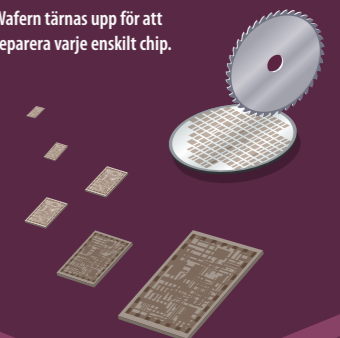


9 Kontroll

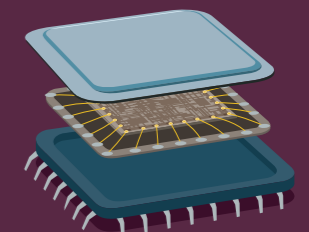
När alla arbetsmoment är gjorda kontrolleras samtliga chip på wafren för att avslöja felaktigheter.



10 Wafern tärnas upp för att separera varje enskilt chip.



11 Chippen läggs i förpackningar och en speciell maskin kallad wirebonder ansluter chippen med ledningar till förpackningsstift



Slutligen kapslas samtliga chip i ett hartz- eller plasthölje och förses med anslutningsstift för att kunna moteras på exempelvis ett moderkort

FÖRKORTNINGAR OCH BEGREPP

AD – Analogt till digitalt

ASIC - Application Specific Integrated Circuit

Integrerade kretsar programspecifika för en viss uppgift.

ASML

Företag i Nederländerna som tillverkar litografmaskiner för halvledarindustrin.

Bandgap

Definitionen bandgap anger avståndet mellan ledningsbandets botten och valensbandets topp. Se grafik sid 10 och 85.

BJT-Bipolär Junction Transistor

En typ av transistor som använder både elektroner och elektronhål som laddningsbärare. Däremot använder en unipolär transistor, såsom en fälteffekttransistor, endast en typ av laddningsbärare.

BiCMOS - Bipolär CMOS

Integrerar två halvledartechnologier, eller tillsammans med CMOS-logikgrindar, i en enda integrerad krets.

BA-s - Borarsenid

Chip (mikrochip)

En elektronisk krets där alla halvledarkomponenter tillverkas tillsammans på samma halvledarsubstrat.

Chiplet

Del av en processormodul som tillsammans med andra chiplets kan skapa en större integrerad krets, till exempel en datorprocessor. Chiplets kan även byggas på höjden, så kallade 3D-chiplets.

CMOS

I CMOS-logik används motsatta (eller komplementära) par av p-kanals- och n-kanals-transistorer tillsammans. Genom att göra så används strömmen endast kortvarigt när man växlar mellan på och av.

CPU - Central Processing Unit

DA- Digitalt till analogt

DHBT - Double Heterojunction Bipolar Transistor

Har heteroövergångar vid både emit-

ter-bas- och bas-kollektorövergångarna. Förbättrar genombrottsspänningen genom att öka det maximala fältet som kan uppnås före genombrott.

DNN

Deep neural networks.

Dopning

Tillsats av ett störmne till en halvledarstruktur för att ändra egenskaperna hos denna. Se sidan 88.

DRAM - Dynamic random-access memory

Ett flyktigt läs- och skrivbart datorminne som ofta används som arbetsminne och i grafikort till datorer.

DRIE – Deep Reactive Ion Etching

Process som används för att skapa djup penetration, branta hål och diken i wafersubstrat.

Diod

En av de grundläggande elektiska komponenterna som normalt endast leder elektrisk ström i en riktning.

DSP - digital signal processing

DSP är signalbehandling av digitala signaler vilka representeras av sekvenser av tal eller symboler. Digital signalbehandling och analog signalbehandling är underområden till signalbehandling.

EDA

Designverktyg, electronic design automation

EMC - Electromagnetic compatibility

Förmågan hos utrustning eller system att fungera i sin elektromagnetiska omgivning utan oacceptabla störningar.

EOM- Electro-Opto-Mechanical Systems

System som kombinerar elektronik, optik och mekaniska system, exempelvis teleskop, satellitspårningssystem, LIDAR-skannrar, specialiserade kamera-system och laserkommunikationstransceivrar.

Epitaxi

Ordnad tillväxt av ett kristallint material på ett annat kristallint substrat.

EUV - Extreme ultraviolet lithography

Senaste generationens litografmaskiner för tillverkning av de minsta halvledarkomponenterna under 7 nanometer.

FD SOI

Silicon on insulator. Ett chip i flera lager med omväxlande halvledande kisel och isolerande material. Används för att minska parasiterande kapacitans.

FGMOS - In a floating-gate MOSFET

Används i icke-flyktigt minne som flashminne för att lagra data

FinFET

MOSFET-typ där gaten sticker upp som en fena. FinFET transistorer är den dominerande gatedesignen från 22 nm ner till 7 nm

FLIR – Forward Looking Infrared

Typ av värmekamera

FPGA - Field-programmable gate array

Programspecifik integrerad krets som programmeras om genom anslutning av exempelvis en kabel.

FMCV - Frequency Modulated Continuous Wave

Radar med kort räckvidd som kan bestämma avstånd.

GAA - Gate-All-Around

Ellerliknar i konceptet en FinFET förutom att gatematerialet omger kanalområdet på alla sidor vilket förbättrar prestanda och miniatyrisering ytterligare.

Ga2O3 - Galliumoxid

GaAs – Galliumarsenid

GaN – Galliumnitrid

GaSb - Galliumantimonid

GHz - Gigahertz

GPU - Graphics processing unit.

Sitter på en dators grafikort och hanterar bland annat signaler från datorn till bildskärmen.

Heteroövergång

Ett gränssnitt mellan två eller flera lager av olika halvledare med olika bandgap. Användbart för att skapa de elektroniska energibanden i många halvledartillämpningar, exempelvis ir-sensorer, halvledarlasrar, solceller och transistorer.

HBT – Hetrojunction Bipolar Transistor

Använder flera halvledarmaterial vid emitter- och basområdena, vilket skapar en hetroövergång och därmed ett justerbart ett bandgap. Kan hantera signaler med frekvenser upp till flera hundra GHz.

HEMT – High-Electron-Mobility Transistor

En fälteffekttransistor som innehåller en övergång mellan två material med olika bandgap - även kallat heteroövergång – vilket erbjuder högre elektronmobilitet och därmed bättre prestanda.

HIGH/K Metal grade

Ett material som ersätter kiseldioxid som oxidlager under gaten vilket tillåter ökad gate-kapacitans utan läckage.

HPM - High Power Microwaves

IC - Integrated circuit

En integrerad krets innehåller två eller flera integrerade halvledarkomponenter på ett chip.

IGBT -Insulated-Gate Bipolar Transistor

InAs - Indiumarsenid

I/O-kontroller

Input/Output och beskriver det dataflöde som sker genom ett gränssnitt.

IoT – Internet of Things

JFET - Junction-gate Field-effect Transistor

Enkel typ av fälteffektstransistor. Föregångare till MOSFET.

Kvantbrunn

Kvantbrunnssystem kan konstrueras genom att trava tunna lager av ett halvledarmaterial med ett visst bandgap mellan två lager av ett material med ett annat bandgap, en så kallad heteroövergång. Kvantbrunnar kallas "brunnar" dels på grund av deras förmåga att fånga in ladd-

ningsbärare, som en brunn skulle fånga in vatten, och dels på grund av deras utseende när de visas i energibanddiagram. Se grafik sid 50-51.

LED - Light-Emitting Diode

Ledningsband

Ledningsbandet är benämningen på de energinivåer hos elektroner i en kristall som gör att elektronerna kan röra sig fritt i materialet.

MESFET- MEtal-Semiconductor Field Effect Transistor

MESFET har en gate av så kallad Schottky-typ (se nedan). Används gärna med sammansatta halvledartechnologier, såsom GaAs, InP eller SiC, vid högre frekvenser och effekter istället för MOSFET men till en högre kostnad.

MOSFET - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

En typ av fälteffekttransistor. Gate är isolerad från substratet av metalloxid vilket ger hög ingångsimpedans.

MOVPE - Metal Organic Vapour Phase Epitaxy

Metod för att växa nanotrådar.

Neuromorfisk

Inspirerad av biologi, ofta hjärnans sätt att arbeta.

nMOS - n-channel Metall-Oxid-Semiconductor

Valensband

Det skal där en atoms yttersta elektroner befinner sig

PCM - Phase change memory

Framtida minnesteknik

pMOS - p-channel Metall-Oxid-Semiconductor

pn-övergång

En pn-övergång bildas där p-dopade och n-dopade halvledare kommer i kontakt. Se grafik sid 72-73, 85 och 89.

ReRAM

Resistive random access memory, framtida minnesteknik

RF – Radiofrekvens

Schottkydiod

En diod med metallhalvledarövergång, som tack vare sin utformning har vissa fördelar. Precis som traditionella dioder med pn-övergång respektive halvledarövergång har schottkydioder en spärrende funktion.

SNN - Spiking Neural Networks.

Är artificiella neurala nätverk som efterliknar naturliga neurala nätverk.

SoC - System On a Chip

En integrerad krets som innehåller flera funktionsblock som exempelvis CPU, GPU, arbetsminne, integrerade på samma chip.

SRAM - Static Random Access Memory

En snabb typ av läs- och skrivbart datorminne som bland annat används som cacheminne i högpresterande mikroprocessorer.

STRAIN – Strained silicon

Kiselatomerna sträcks utöver deras normala interatomära avstånd vilket resulterar i bättre chipprestanda och lägre energiförbrukning.

STT-MRAM

Spin-transfer torque magnetic random access memory, framtida minnesteknik

TinyML eller TML - Tiny Machine Learning

En ny typ av maskininläring.

THz - Terahertz

TSMC

Taiwan semiconductor manufacturing company. En av världens största tillverkare av integrerade kretsar.

Tunneldiod

Diodtyp med en kraftigt dopad PN-övergång. Den hårda dopningen resulterar i ett brutet bandgap där ledningsbands elektroner på n-sidan är mer eller mindre i nivå med valensbandet på p-sidan.

VTFET

Ny transistortyp som byggs på höjden istället för horisontellt vilket gör att source och drain kan byggas större vilket gör att strömflödet kan ökas. En längre gate utesluter också oönskat elektronläckage.

Rapporten är sammanställd av FoT-projektet Omvärldsbevakning med teknisk prognos.

TEXT: Jan-Ivar Askelin

GRAFIK: Martin Ek

GRAFISK FORM: Peter Ehrlin

FOTO: Jan-Ivar Askelin om inget annat anges

TRYCK: FMLOG Försörjning Grafisk Produktion

FMV dokumentbeteckning: 22FMV1402-9

December 2022