

HALV - LEDAR - ÅLDERN

kemin bakom
dagens teknik

fri tanke

HENRIK
PEDERSEN

Innehåll

Prolog	7
Lagen som ingen vill bryta mot	13
Halvledaråldern	27
Tillverka chip	49
Transistorer.....	91
Atomslöjd	109
Ännu mindre transistorer	145
Elektronik är inte bara transistorer.....	163
En tredjedel av det periodiska systemet i fickan	179
Men är detta egentligen hållbart?.....	201
Framtidens elektronik.....	217
Epilog	237
 Tack	 241
Referenser	243
Bildkällor	249

Prolog

VI LEVER NUMERA i halvledaråldern. Vet du vad en halvledare är? Många har kanske hört ordet nämnas på nyhetssändningar, men aldrig riktigt förstått vad det innebär. Idag är det nästan svårt att hitta exempel på saker i vår vardag, och i våra liv, där halvledare inte spelar en nyckelroll för att vi ska kunna göra dem. Det sitter små komponenter av halvledarmaterial, ofta kallar vi dem för chip, i nästan allt. Chipen gör så att datorn och telefonen fungerar, men också bilen, tvättmaskinen, kylskåpet och, inte minst, hela internet.

Detta blev tydligt för många i början av covid-19-pandemin när det började talas om en brist på halvledare. Nu var det aldrig någon brist på själva halvledarmaterialet, den vanligaste halvledaren är kisel och det finns i all sand. I stället var det brist på produktionskapacitet för halvledarchipen. Inom bilindustrin trodde många i början av pandemin att de inte skulle kunna sälja så mycket bilar. Därför hörde de av sig till fabrikerna som gör halvledarchip och sa att de inte behövde alla chip de hade beställt. När folk var tvungna att stanna hemma under pandemin ville många ha en ny spelkonsol eller en ny TV, och när många började jobba hemma behövdes fler skärmar,

datorer och webbkameror. Alla elektronikföretag beställde därför mycket fler chip. Sedan märkte bilindustrin att de visst sålde bilar och därmed behövde chipen, men nu var de sist i kön till produktionen, och halvledare och deras kris hamnade i många nyhetssändningar.

Men hur blev det så här? Att något som vi är så beroende av i våra liv, inte kunde tillverkas i tillräckliga volymer? I takt med att elektronik, som datorer och mobiltelefoner, blir allt mindre och alltmer energieffektiv, måste de elektroniska komponenterna i halvledarchipen bli alltmer komplicerade. Komponenterna, som transistorer och kondensatorer, är i dag nästan ofattbart små. De är inte större än några miljarddelar av en meter, dessutom med ganska komplexa geometrier. Tillverkningen av elektronik innebär att hundratal miljoner av dessa komponenter ska tillverkas samtidigt, och alla måste se precis lika ut för att chipet ska fungera. Här ligger komplexiteten bakom halvledarkrisen, det finns bara en handfull företag i världen som har kunnandet för att tillverka chip.

Tillverkningen av chip är möjlig tack vare vetenskapliga och tekniska landvinningar som gjorts sedan 1950-talet. Alla komponenter i ett chip tillverkas genom att de etsas fram ur ett stycke av ett material som leder elektrisk ström på ett väldigt kontrollerat sätt. Denna typ av material kallas halvledare eftersom de inte leder ström lika bra som elektriska ledare, som

koppar, men inte heller lika dåligt som elektriska isolatorer, som plast, utan halvybra. Att etsa fram ett par miljarder komponenter på en gång är inte alls enkelt. Det krävs flera komplexa processer som använder många kemiska principer. Men det är inte nog med att etsa, man måste också kunna deponera andra material på den frametsade strukturen. Detta kräver än mer kemisk kunskap.

Kemi är troligen inte det första man tänker på när man tänker på vilken vetenskap som är viktig för utvecklingen av ny elektronik. Det råder ingen tvekan om att elektroteknik, datavetenskap, fysik och mjukvaruteknik är ovärderliga vetenskaper för att skapa bättre elektronik. Men all elektronik, precis som allt annat i vår värld, är uppbyggd av atomer. Kemi är vetenskapen som förklarar hur atomer bildar molekyler och hur molekyler uppför sig och reagerar med varandra. Det är tack vare kemin som vi överhuvudtaget har dagens elektronik och kan leva i halvledaråldern. Fysiker och elektroingenjörer förstår och designar elektroniken, men kemisterna gör den möjlig.

Som de flesta kemister samarbetar jag med forskare som har sitt ursprung i andra vetenskapliga discipliner. Min forskning tar mig oftast till gränslandet där kemi möter materialvetenskap och elektronik. Och jag tar mig dit genom att samarbeta med fysiker, och materialvetare. Jag ser mig därför främst som en materialkemist. Materialkemi är den grenen inom

kemin som förklarar hur olika material fungerar, byggs upp och skapas med olika kemiska reaktioner. Mina fysikerkollegor skrattar ibland till och säger att det där är ju inte kemi, det är ju fysik. Och det är det som är spännande med forskning där flera vetenskapliga discipliner möts – vi tittar på samma problem från två, eller flera, lite olika håll. Eftersom vi har lite olika sätt att tänka när vi beskriver världen och det som sker i den, beroende av vilken vetenskap vi är skolade i, så kan vi ibland missförstå varandra, ibland helt prata förbi varandra. Men ibland komma på helt nya och fantastiska saker tillsammans. När det händer finns det få saker som är så spännande att hålla på med som forskning.

Med den här boken vill jag visa kemins roll för att vi ska kunna köpa en ny mobiltelefon, dator eller annan elektronik. Jag vill ta med dig på en resa ner till atomnivån och visa hur svindlande liten dagens elektronik är. Ett chip, stort som ett frimärke, är processorn i din dator. Processorn är uppbyggd av tusentals miljoner strömbrytare, eller transistorer som de kallas. Varje transistor är bara några tiotals atomer bred. Alla tusentals miljoner transistorer måste fungera och kommunicera med varandra för att processorn, och därmed datorn, ska fungera. För mig känns det ofta som science fiction att man inte bara kan tillverka dagens elektronik, utan även tillverka den i stor skala och till ett vettigt pris.

Kemi är en långt mycket mera spännande vetenskap än många tyvärr har fått för sig. Kemin botar hemiska sjukdomar, löser många av klimatkrisens problem, tar oss ut i rymden och, som du kommer att se om du läser vidare, låter mig skriva denna bok – eftersom jag gör det på en dator som har tillverkats av kemi, styrs av kemi och drivs av kemi.

Mycket nöje i atomernas värld!

Lagen som ingen vill bryta mot

VÅREN 1965 SATT kemisten Gordon Moore i Kalifornien och arbetade med en artikel han hade blivit ombedd att skriva för tidskriften *Electronics*. Några år tidigare hade han varit med och grundat elektronikföretaget Fairchild Semiconductors* och nu ledde han företagets forskning inom integrerad elektronik. På 1960-talet var detta ett ganska nytt forskningsfält och utvecklingen gick väldigt snabbt. Moores labb på Fairchild Semiconductors låg i utvecklingens framkant och gjorde flera viktiga upptäckter. Nu tänkte Moore sammanfatta sin syn på denna utveckling, och vad den betydde för den snabbt växande elektronikindustrin, i artikeln han skrev.

Integrerad elektronik bygger på vanlig elektronik, där man konstruerar elektriska kretsar genom att koppla ihop olika komponenter med sladdar. Ett exempel är en gammaldags radioapparat som är uppbyggd av transistorer, dioder och motstånd, alla till-

* Semiconductor är engelska för halvledare.

verkade var och en för sig och sedan sammankopplade genom att man fäster dem på en platta och löder fast sladdar på dem. Det fiffiga med integrerad elektronik är att här byggs inte apparaterna ihop från komponenter som gjorts var och en för sig, utan alla elektroniska komponenter konstrueras i ett och samma stycke material. En uppenbar fördel med detta är att elektroniken kan göras mycket mindre. Eftersom man nu behövde ett mikroskop för att se komponenterna hade man börjat tala om mikroelektronik.

Idén att göra flera komponenter i samma bit material föddes i början på 1950-talet, kort efter att transistorn hade uppfunnits 1947. Men det skulle ta till slutet av 1950-talet innan någon lyckades göra en fungerande integrerad krets. Våren 1958 började Jack Kilby, en ganska nyutbildad elektroingenjör, arbeta på företaget Texas Instruments. Eftersom han började arbeta på företagen på våren hade han inte tjänat ihop någon semester till sommaren. När större delen av företaget gick på semester under sommaren, blev Kilby nästan helt ensam kvar. Han hade gott om tid för att sitta och fundera. Han började fundera på hur man skulle kunna skapa olika sorters elektroniska komponenter i grundämnet germanium (Ge). De första transistorerna gjordes i germanium och Kilby funderade på om det inte gick att också göra andra sorters komponenter än transistorer i germanium. Han kom på olika sätt att göra ett par olika sorters

komponenter av germanium, och insåg sedan att om alla komponenterna kunde göras av germanium, skulle man kunna göra alla komponenter på samma bit germanium. När hans chefer kom tillbaka efter semestern visade han sina idéer för dem. De var lite skeptiska men bad honom ändå att göra en enkel prototyp för att se om det verkligen kunde fungera. Och den väldigt enkla konstruktionen i prototypen visade att det fungerade. Ett par olika komponenter, som hade gjorts på samma bit germanium, fungerade tillsammans som en elektrisk krets. Kilby tillbringade hösten 1958 med att förbättra sin konstruktion och göra den mer komplex. Han och ett par andra på Texas Instruments lyckades även övertyga det amerikanska flygvapnet om att integrerade kretsar var framtiden för elektroniken i stridsflygplan. Intresset från en stor potentiell kund övertygade många på Texas Instruments att detta var något att satsa på. I början av februari 1959 skickade företaget in en patentansökan på en integrerad krets, baserad på Jack Kilbys arbete.¹

Men Jack Kilby var inte ensam om att utveckla integrerade kretsar. En annan som också arbetade mycket med detta var fysikern Robert Noyce, som tillsammans med Gordon Moore varit med och grundat Fairchild Semiconductors. Noyce arbetade med forskning och utveckling på företaget och hade ett annat sätt att ta sig an problemet. Han forskade på bättre sätt att göra transistorer, tillsammans med andra

forskare på Fairchild Semiconductors utvecklade han en process för att tillverka en ny typ av transistorer som visade sig vara enklare att tillverka. De bytte också grundämne och tillverkade transistorerna av kisel (Si) i stället för av germanium. Noyce insåg att man ganska lätt kunde tillverka flera sådana transistorer bredvid varandra på samma bit kisel.

När en patentansökan har lämnats in är den hemlig för alla utom för de på patentverket som ska granska den för att se om något liknande redan har uppfunnits. Oftast är en patentansökan hemlig i 18 månader. När Robert Noyce lämnade in en patentansökan på sin uppfinning för att göra en integrerad krets, i slutet av juli 1959, kände han alltså inte till Kilbys patentansökan. Men när både Kilbys och Noyces ansökningar granskats och blivit offentliga verkade det som att de beskrev väldigt lika uppfinningar. Detta resulterade i ganska tuffa domstolsförhandlingar mellan Texas Instruments och Fairchild Semiconductors om vilket företag som hade rätten till uppfinningen av den integrerade kretsen. Till slut vann Texas Instruments den striden. Men Fairchild Semiconductors lösning på hur man ska tillverka en integrerad krets visade sig vara den bästa, därför tog Fairchild ledningen i kampen om att göra de bästa kretsarna. Gordon Moore, Robert Noyce och deras kollega Jean Hoerni, en schweizisk fysiker som flyttat till USA för att forska och sedan var en av de som grundade Fairchild Semiconductors,

gjorde flera viktiga uppfinningar för att tillverka bättre integrerade kretsar. Detta gjorde Fairchild Semiconductors till ett världsledande elektronikföretag.

I början av 1960-talet tävlade USA och Sovjetunionen om att bli först ut i rymden. Sovjetunionen var först med att skicka upp både en satellit och en människa i rymden, men USA blev först med att landa människor på månen. Kapplöpningen till månen bidrog till att de integrerade kretsarna utvecklades ännu mera och dessutom snabbt blev accepterade som det bästa sättet att konstruera och tillverka elektronik. NASA blev med sitt Apolloprogram den största köparen av integrerade kretsar under första halvan av 1960-talet. Bitarna av material som de integrerade kretsarna konstruerades av började ganska snart kallas chip, eftersom de bestod av tunna skivor. Efter Noyces, Moores och Hoernis uppfinningar stod det klart att skivor av kisel är det bästa valet för att göra integrerad elektronik. När chippen var riktigt små kallades de för mikrochip eftersom man behövde mikroskop för att kunna se alla komponenter på dem ordentligt.

Artikeln som Gordon Moore skrev 1965 skulle komma att bli en milstolpe i elektronikutvecklingen. Till sammans med Robert Noyce och de andra forskarna på Fairchild Semiconductors var Gordon Moore i den absoluta framkanten av forskningen kring integrerad elektronik. Och utvecklingen gick hela tiden rasande snabbt. I artikeln som Moore skrev 1965 konstaterade

han att antalet komponenter, framför allt transistorer, i mikrochipen som tillverkades bara ökade och ökade i takt med att man kunde göra komponenterna allt mindre. Antalet transistorer på ett mikrochip hade faktiskt dubblats vartannat år sedan 1959 när den integrerade kretsen hade uppfunnits, till 1965 när Moore skrev på sin artikel. Gordon Moore drog en rät linje från de datapunkter han hade och konstaterade att om denna takt håller i sig så kommer man om tio år, alltså 1975, att kunna tillverka mikrochip med 65 000 komponenter.² Han menade också att takten troligen skulle vara nödvändig för den tidiga elektronikindustrins överlevnad, lägre takt skulle innebära för låga vinster. Många säljare och andra inom Fairchild Semiconductors började visa graferna med data från Moores artikel på säljmöten och möten inom och utanför företaget. Ganska snart började de flesta i branschen tycka att utvecklingstakten som Moore hade observerat var självklar. Den blev en förutsägelse som alla räknade med skulle fortsätta slå in.

Det engelska ordet för grundämnet kisel är *silicon*. Detta får inte förväxlas med det svenska ordet »silikon« vilket är ett samlingsnamn för olika föreningar av kisel, syre, kol och väte. Silikonmolekyler bildar långa kedjor som skapar ett segt material som kan används till allt från tätningsmedel till bröstimplantat. Silicon har gett namn till ett område strax söder om San Francisco på USA:s västkust, Silicon

Valley,* där väldigt mycket av utvecklingen av dagens elektronik och stora delar av internet som vi känner det i dag har skett. Fairchild Semiconductors låg också i Silicon Valley, och var ett av de företagen som såg till att området i dag är så känt och nästan mytomspunnet. Både Moore och Noyce blev kända profiler i elektronikindustrins barndom. Robert Noyce kallades till och med ofta för Silicon Valleys borgmästare. I Silicon Valley ligger i dag många av de största elektronikföretagen och här hittar vi Google, Microsoft och Apple, men också ansedda universitet som Stanford och Berkeley.

Tiden gick och 1975 fick Moore möjlighet att tala på en vetenskaplig konferens om elektroniska komponenter och kunde då glatt konstatera att hans förutsäggelse från 1965 faktiskt slagit in.³ Man kunde nu ganska enkelt tillverka mikrochip med 65 000 transistorer. Det som vi känner som Moores lag, att antalet komponenter på ett mikrochip dubblas vartannat år, hade myntats. Alla företagen i Silicon Valley, och i de andra stora elektroteknikområdena i världen, har sedan 1975 försökt hålla uppe takten i Moores lag och dubbla antalet komponenter på ett mikrochip vartannat år. Detta har drivit utvecklingen av elektroniken som vi har kunnat se sedan 1960-talet. I dag har vi mycket

* Namnet Silicon Valley antyder inte att det finns stora kisel fyndigheter där. Men det gör det faktiskt, eftersom all sand på jorden består främst av kisel och syre i föreningen kiseldioxid.

mera datorkraft i våra smarta mobiltelefoner än i de enorma datorer som såg till att Neil Armstrong och Buzz Aldrin kunde ta de första stegen på månens yta 1969. Samtidigt kostar våra smarta telefoner betydligt mindre än de datorer som NASA använde för månlandningen. Och tur är väl det. En vanlig jämförelse för att illustrera elektronikutvecklingen är att om bilindustrin skulle haft samma utveckling som elektronikindustrin sedan 1960-talet skulle man i dag kunna köra en miljon kilometer på en liter bensin och haft bilar som kunde köra flera hundra tusen kilometer i timmen, utan att de skulle vara dyrare än dagens bilar.

Att hålla uppe takten i Moores lag har varit en viktig drivkraft för elektronikindustrin. Säkert mycket på grund av prestige, men också för att vi som köper elektroniken har krävt det. Vi tar för givet att vi ska kunna köpa en ny telefon eller dator med ett par års mellanrum. Den nya ska såklart vara mycket bättre än den gamla, vara snabbare, ha bättre minne och kunna göra häftigare saker, men får helst inte kosta mer än den gamla. Ibland tolkar man Moores lag som att priset för ett visst antal komponenter i ett mikrochip ska halveras vartannat år. Elektronik ska alltså bli både mindre, kraftfullare och billigare på samma gång.

Hjärtat, eller kanske snarare hjärnan, i en smart mobiltelefon är dess processor, ett mikrochip, stort som en fingernagel. En processor använder transistorer, väldigt små strömbrytare, för att skapa de digitala

signalerna, etterna och nollorna, i telefonen eller datorn. Processorn i en modern smart telefon innehåller mellan sju och nitton miljarder transistorer. Processorn i en vanlig dator, som har mera datorkraft än en smart mobiltelefon, innehåller ofta mer än tio miljarder transistorer, och de mest kraftfulla kan ha så många som 50 miljarder transistorer. För att få plats med så många transistorer på en så liten yta måste varje transistor såklart vara väldigt liten. Transistorernas storlek mäts i nanometer och en nanometer är en miljarddels meter, eller en miljondels millimeter. De transistorer vi har i dagens mobiltelefoner är inte större än omkring tio nanometer, det är lika långt som 50 kiselatomer på rad.

Att överhuvudtaget fundera ut hur man kan göra något som är så litet som 50 atomer, som dessutom fungerar som en strömbrytare är enormt fascinerande. Att sedan faktiskt kunna tillverka denna lilla strömbrytare så att den fungerar är ännu mera fascinerande. Men att kunna tillverka tio miljarder så små strömbrytare, på ett kiselchip stort som en fingernagel, där alla tio miljarderna fungerar, och dessutom kan kommunicera med varandra är nästan science fiction. Men bara nästan. För detta görs hela tiden. Uppfinningarna som Noyce, Hoerni och Moore utvecklade på 1960-talet la grunden till denna tillverkning, men, som vi ska se i de kommande kapitlen, har den utvecklats mycket sedan dess.