

Moore's lag – vid vägs ände efter 50 år?

Docentföreläsning 2015-12-14

Ted Johansson, EKS, ISY

Moore's lag – vid vägs ände efter 50 år?

- Teds kort-CV
- Moore's lag
 - Dennard-skalning
 - Skalning bortom 130 nm: nya koncept
 - Skalning bortom 7 nm: nya material och komponenter
- Moore's lag och radiokretsar
 - Effektförstärkarkonstruktion i skalad CMOS för radio
 - FinFET och radio

Ted Johansson: kort-CV



- 1985: M.Sc. (Y, LiU + RWTH, Germany)
- 1985-1989: Institute of Microelectronics, Kista
- 1989-2002: Ericsson Microelectronics, Kista
- 1992-1998: Industrial PhD (LiU)
- 2002-2007: Infineon Technologies, Kista
- 2008-2011: Huawei R&D Center, Kista
- Own company/consulting 2008-
- Adjunct professor (external, part-time): 2009-
Research on PA design in CMOS
PhD supervision
2015/VT1: undergraduate course TSEK03 "RFIC"
2015/VT2: PhD course "State-of-the-art Electron Devices"
2015/HT2: undergraduate course TSEK02 "radio electronics"



Snart kan tekniken inte bli mindre

NATURLAGARNA SÄTTER STOPP FÖR HUR SMÅ DE ELEKTRONISKA KOMPONENTERNA KAN BLI

Så snart tekniken är utvecklad har den elektroniken blivit en mindre del av allt som vi använder oss av. Det kan vara minuter och sekunder. Ett klockverk kan innehålla flera tusentals komponenter. Det betyder att vi har ett stort antal komponenter i varje liten del av ett klockverk.

Men nu är forskare, professorer och tekniker som arbetar med elektroniken överens om att gränserna för hur mycket man kan packa in komponenter i en liten del av ett klockverk är redan nådd. För dessa gränser är det naturlagarna och inte tekniken som sätter stopp, säger Magnus Karlsson, docent i fysik vid Chalmers tekniska högskola i Göteborg, och forskare.

Elektroniska kretsar är byggda av atomer och dessa har en viss storlek som inte kan bli mindre. För att elektroniska kretsar ska fungera måste man arbeta med komponenter på minst ett par atomer. Mindre än så går det inte.

DET ÄR teknologiska kretsar som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

Det blir då en viss storlek som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

Det blir då en viss storlek som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

Det blir då en viss storlek som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

kan den fysikaliska gränsen inte ses mellan dem och tio år. I dag arbetar forskare med komponenter som bara är tio nanometer i diameter. Det betyder att man kan bygga kretsar som är tio gånger mindre än de som vi använder oss av idag. Det betyder att man kan bygga kretsar som är tio gånger mindre än de som vi använder oss av idag.

ALLA FÖRETAG som arbetar med elektroniska kretsar är överens om att gränserna för hur mycket man kan packa in komponenter i en liten del av ett klockverk är redan nådd. För dessa gränser är det naturlagarna och inte tekniken som sätter stopp, säger Magnus Karlsson, docent i fysik vid Chalmers tekniska högskola i Göteborg, och forskare.

Elektroniska kretsar är byggda av atomer och dessa har en viss storlek som inte kan bli mindre. För att elektroniska kretsar ska fungera måste man arbeta med komponenter på minst ett par atomer. Mindre än så går det inte.

Det blir då en viss storlek som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

Det blir då en viss storlek som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

Det blir då en viss storlek som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.



Nanofysikerna professor David Haveland och doktorand Martin Ulfvick bedriver daglig forskning för att skapa mindre elektroniska kretsar till nanometer.

Ericsson oroar sig inte över krympande komponenter

På Ericsson tror man inte på att komponenterna kommer att krympa. Det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

Det blir då en viss storlek som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

Det blir då en viss storlek som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

Det blir då en viss storlek som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

Mindre kretsar krävs för nanoteknologin

Professor David Haveland på KTH i Stockholm har tagna de senaste 15 åren för givet facket i nanoteknologi. En teknik som i framtiden kan komma att ersätta dagens mikroelektronik.

Storliga anlag
David Haveland och hans forskningslag arbetar med forskning i nanoteknologi genom statliga anslag. Detta innebär att man på sina håll har experimenterna med nanoteknologi som inte bara i någon större skala. Det är dock inte säkert på att nanoteknologin kommer att bli en stor bransch som den svenska elektroniken.

Det blir då en viss storlek som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

Kretsarna för stora
Professorer är att man är alla minsta elektroniska kretsar som tillverkas i dag är tillräckligt stora för att kunna transporteras av nanoteknologiska ledningsbanor.

Det blir då en viss storlek som inte kan byggas mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.



Lösning på ett upplöst bildkort. Bilderna är bara en miniatyr av det som faktiskt är ett elektroniskt bildkort. Bilden visar hur bilderna kommer in i kameran och sedan ut till skärmen.

Några teknologiska gennombrott under 2000 år

- 1800: Elektricitet
- 1850: Elektriska kretsar
- 1875: Elektriska maskiner
- 1880: Elektriska lampor
- 1890: Elektriska telefoner
- 1900: Elektriska tvättmaskiner
- 1910: Elektriska kylskåp
- 1920: Elektriska radioapparater
- 1930: Elektriska tvapparater
- 1940: Elektriska kylskåp
- 1950: Elektriska tvättmaskiner
- 1960: Elektriska kylskåp
- 1970: Elektriska tvättmaskiner
- 1980: Elektriska kylskåp
- 1990: Elektriska tvättmaskiner
- 2000: Elektriska kylskåp

Utläsa av forskning
På Ericsson tror man inte på att komponenterna kommer att krympa. Det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket. Mindre komponenter innebär mycket mindre storlek och det betyder att man inte kan bygga kretsar som är mindre än så mycket.

Metro NATURLAGARNA SÄTTER STOPP FÖR HUR SMÅ DE ELEKTRONISKA KOMPONENTERNA KAN BLI

Snart kommer mindre kretsar krävs för nanoteknologin

Så snart tekniken utvecklas till elektroniska kretsar som är mindre än ett hårnål, kommer att ersätta dagens mikroelektronik. En teknisk revolution som kommer att ersätta dagens mikroelektronik. En teknisk revolution som kommer att ersätta dagens mikroelektronik.

Men nu är forskare, professorerna i fysik och elektronik vid KTH i Stockholm, och deras kollegor i andra delar av världen, som arbetar med att skapa en helt ny generation av elektroniska kretsar. De är mindre än ett hårnål, och de kommer att ersätta dagens mikroelektronik. En teknisk revolution som kommer att ersätta dagens mikroelektronik.

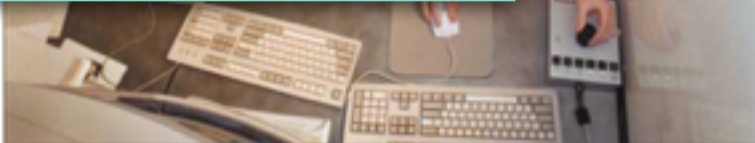
Det här är en utmaning för ingenjörer och forskare över hela världen. De måste hitta sätt att skapa kretsar som är mindre än ett hårnål, och de måste hitta sätt att bygga dem. Det är en utmaning för ingenjörer och forskare över hela världen.

Mindre kretsar krävs för nanoteknologin

Professor David Haviland på KTH i Stockholm har ägnat de senaste 13 åren åt att forska i nanoteknologi. En teknik som i framtiden kan komma att ersätta dagens mikroelektronik.

Nanoteknologin är jämfört med mikroelektroniken en avsevärt mer förfinaad teknik med beståndsdelar som endast är en tusendel så stora.

Fördelen med nanoteknologin är att man med en enda elektron kan skapa en elektronisk laddning.



NanoFysikerna professor David Haviland och doktorand Maria Ulfvick behåller daglig forskning för att förstå fysiska elektroniska kretsar till nanoskala.

Ericsson oroar sig inte över krympande komponenter

På Ericsson råder man med att skapa tekniska lösningar som inte är tillräckligt små för att ersätta dagens mikroelektronik.

Ericsson oroar sig inte över krympande komponenter

Men även om komponenterna blir mindre och mindre, så kommer de fortfarande att vara till nytta. De kommer att användas i en mängd olika applikationer, från mobiltelefoner till avancerade medicinska utrustningar.

Det är dock viktigt att komma ihåg att mindre inte alltid betyder bättre. Det är viktigt att säkerställa att de mindre kretsarna fortfarande kan hantera den mängd data som krävs för att fungera korrekt.

Det är också viktigt att säkerställa att de mindre kretsarna fortfarande kan hantera den mängd data som krävs för att fungera korrekt.

Det är också viktigt att säkerställa att de mindre kretsarna fortfarande kan hantera den mängd data som krävs för att fungera korrekt.

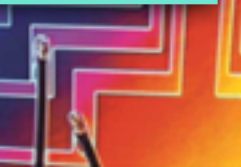
Det är också viktigt att säkerställa att de mindre kretsarna fortfarande kan hantera den mängd data som krävs för att fungera korrekt.

Några teknologiska genombrott under 2000 år

- 1950** Flygplan (jetmotor) och tvättmaskin
- 1960** Rymdfärd (Satellit) och datorer
- 1970** Mikroprocessorer (IC) och videokameror
- 1980** Mikroprocessorer (IC) och videokameror
- 1990** Mikroprocessorer (IC) och videokameror
- 2000** Mikroprocessorer (IC) och videokameror

Utläsa av forskning

På Ericsson råder man med att skapa tekniska lösningar som inte är tillräckligt små för att ersätta dagens mikroelektronik.



Lösning på ett avancerat tekniskt problem är att använda sig av en mikroelektronisk krets som är mindre än ett hårnål.

- Sammanfattning / Sammenfatning:**
- **Adresser:** De som vill veta mer om detta ämne.
- **Elektronik:** En teknik som har utvecklats snabbt under de senaste åren.
- **Utläsa av forskning:** En viktig del av den tekniska utvecklingen.
- **Utläsa av forskning:** En viktig del av den tekniska utvecklingen.

Metro 2000-09-21

Snart kan tekniken inte bli mindre

Ericsson oroas av krympande komponenter

35 nm!

2015!

På Ericsson räknar man med att kunna fortsätta förminska sin elektronik utan större problem i åtminstone 15 år till.

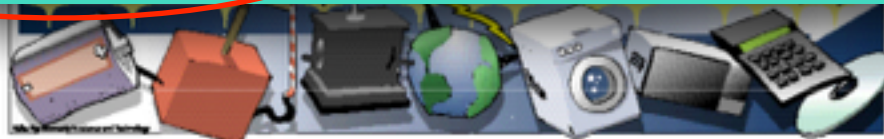
Ju mindre elektroniska komponenter, desto fler och snabbare tjänster får man plats med i en produkt. Detta leder i sin tur till ökade förtjänster.

Ted Johansson är expert på kretstillverkning på Ericssons

utvecklingsavdelning i Kista. Han är inte speciellt orolig för framtiden och tycker forskarna dramatiserar elektronikens fysiska gräns en del.

– Visst, det är sant att atomerna flyttar sig från sitt läge om man börjar laborera med alltför små komponenter, men vi är inte där ännu. I dag är våra minsta komponenter i storleksordningen 180 till 250 nanometer.

–SIA, som är något av global branschorganisation för kretstillverkare, har tagit fram en studie som visar att man lugnt kan fortsätta förminska elektroniken i samma takt som hittills fram till och med år 2015. Då skulle vi vara nere på komponenter i storleksordningen 35 nanometer vilket fortfarande är över den fysikaliska gräns som forskarna talar om, säger Ted Johansson.



Det innebär att Ericsson i framtiden kan tillaga fler och fler funktioner till sina produkter utan att behöva öka storleken på dem. Detta innebär att de minsta komponenterna i elektronik är de minsta komponenterna i elektronik.

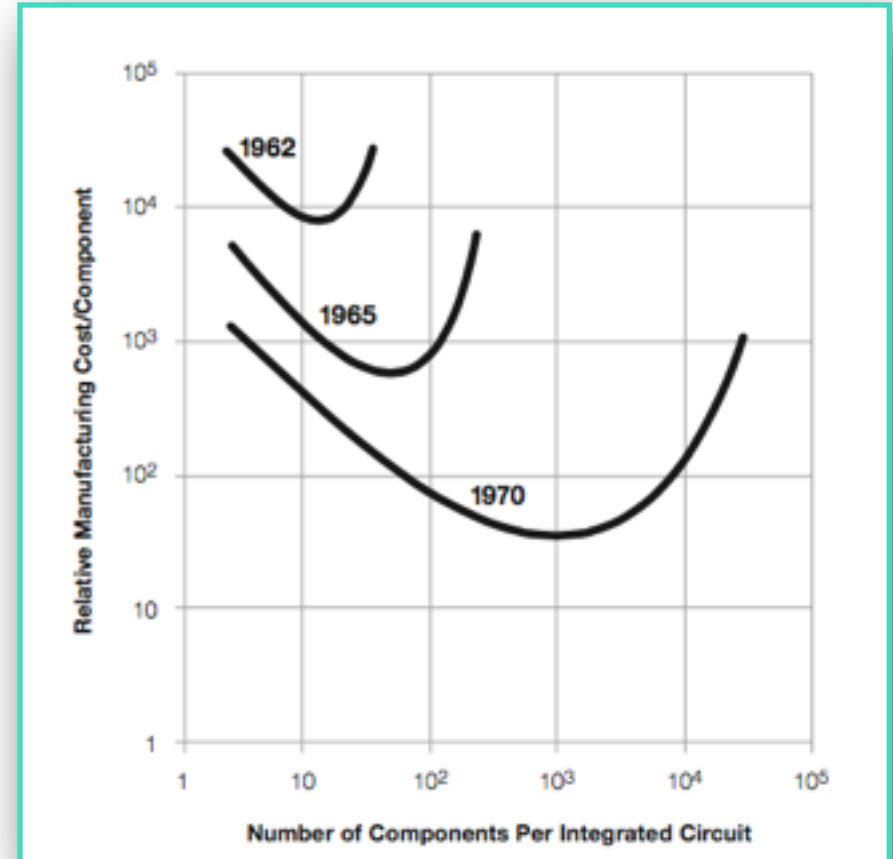
– Så kan det bli, men det är något som jag inte vill tro på. Det är något som jag inte vill tro på. Det är något som jag inte vill tro på.

Ericsson / SIA 2000-09-21

- Atomen är den minsta beståndsdel i all materia.
- Elektronen är den minsta elektriskt laddade partikel som observerats. Den utgör en av byggstenarna i en atom.
- Helt enkelt är en elektron ett negativt laddat partikel som utgör en av byggstenarna i en atom.
- Helt enkelt är en elektron ett negativt laddat partikel som utgör en av byggstenarna i en atom.

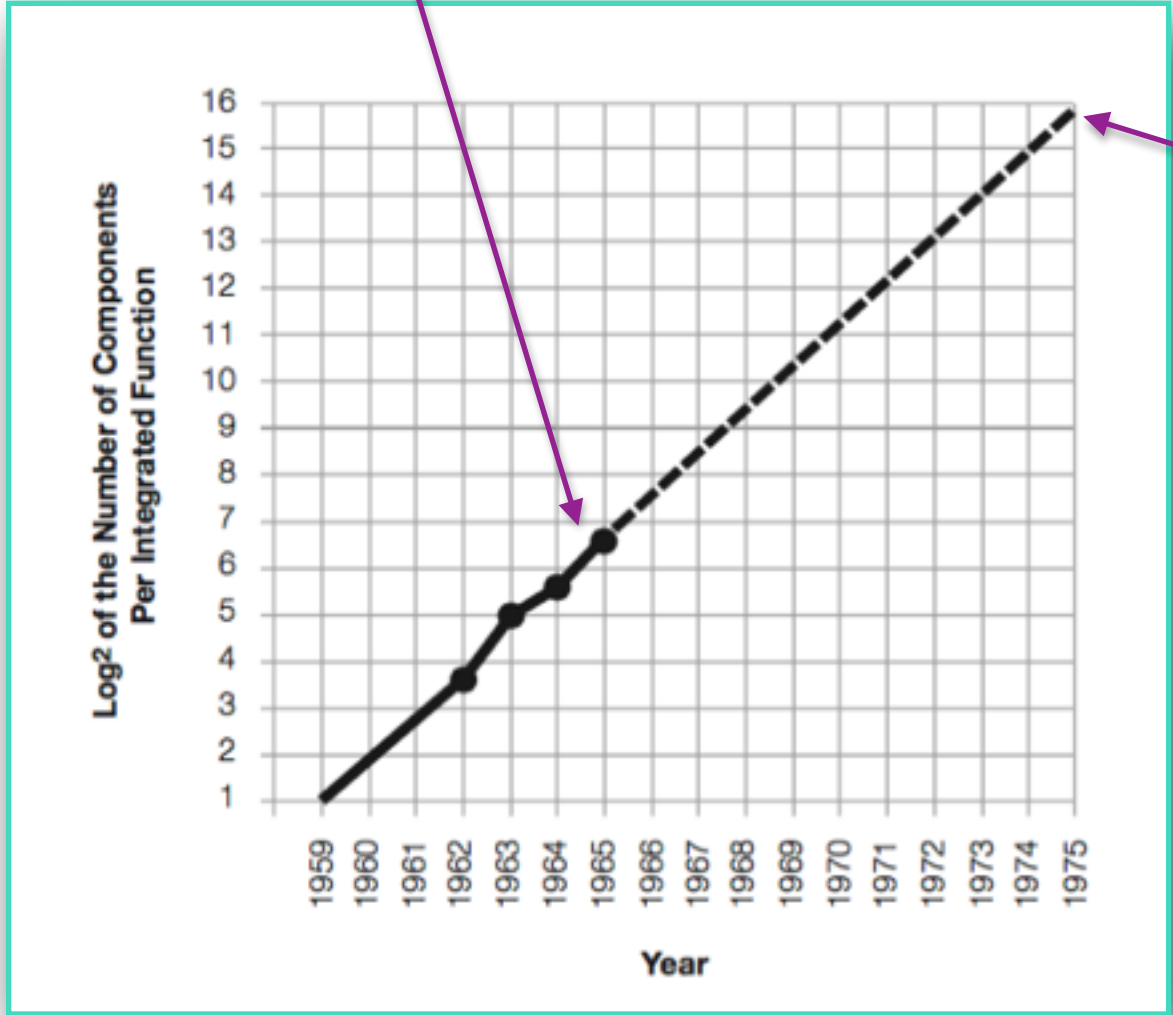
Källa: Nationella tekniska högskolan i KTH

Moore's lag handlar inte om skalning utan om ekonomi!



Moore 1965: fördubbling varje år

50 transistorer!



65000 transistorer
tio år senare!

Dennard-skalning av MOS-komponenter

Komponent/kretsparameter	Skalfaktor*
Komponentdimension/tjocklek	$1/\lambda$
Dopkoncentration	λ
Styroxidtjocklek	$1/\lambda$
Spänning	$1/\lambda$
Ström	$1/\lambda$
Kapacitans	$1/\lambda$
Fördröjningstid (1/hastighet)	$1/\lambda$
Transistoreffekt	$1/\lambda^2$
Energieffektivitet ("MIPS/W")	$1/\lambda^3$
Effektdensitet	1

* för konstant elektriskt fält



Robert Dennard

Dennard & Moore 1975-2000: Det vinnande laget!

Dennard-skalning när transistorerna blir mindre:

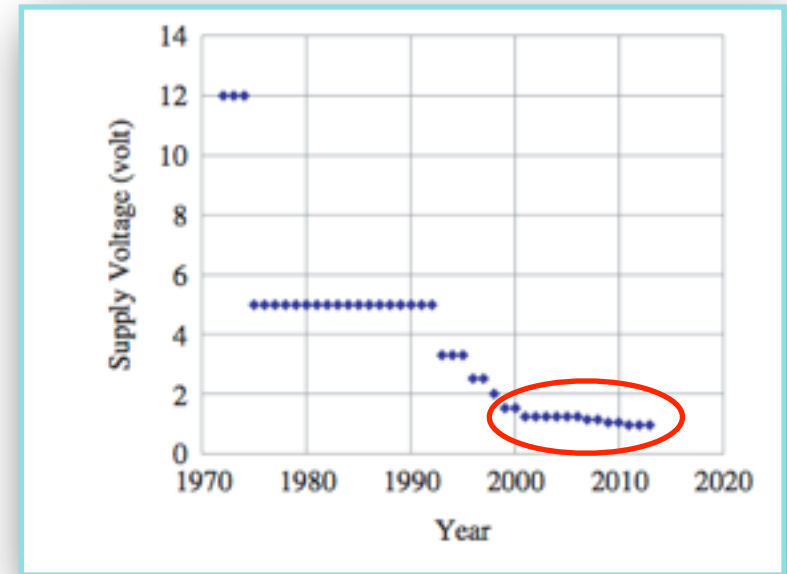
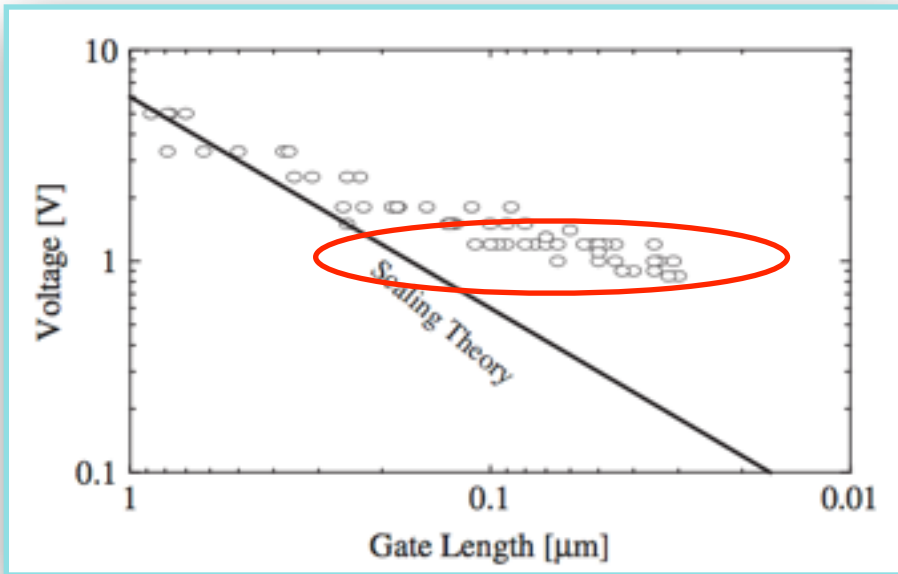
- snabbare komponenter och kretsar,
- lägre total effekt (konstant effektdensitet),
- elektronik kan göras mindre, lättare, bättre.

Moores lag:

- samma kostnad per yta när komponenterna krymper,
- mer transistorer per chip och lägre kostnad per transistor.

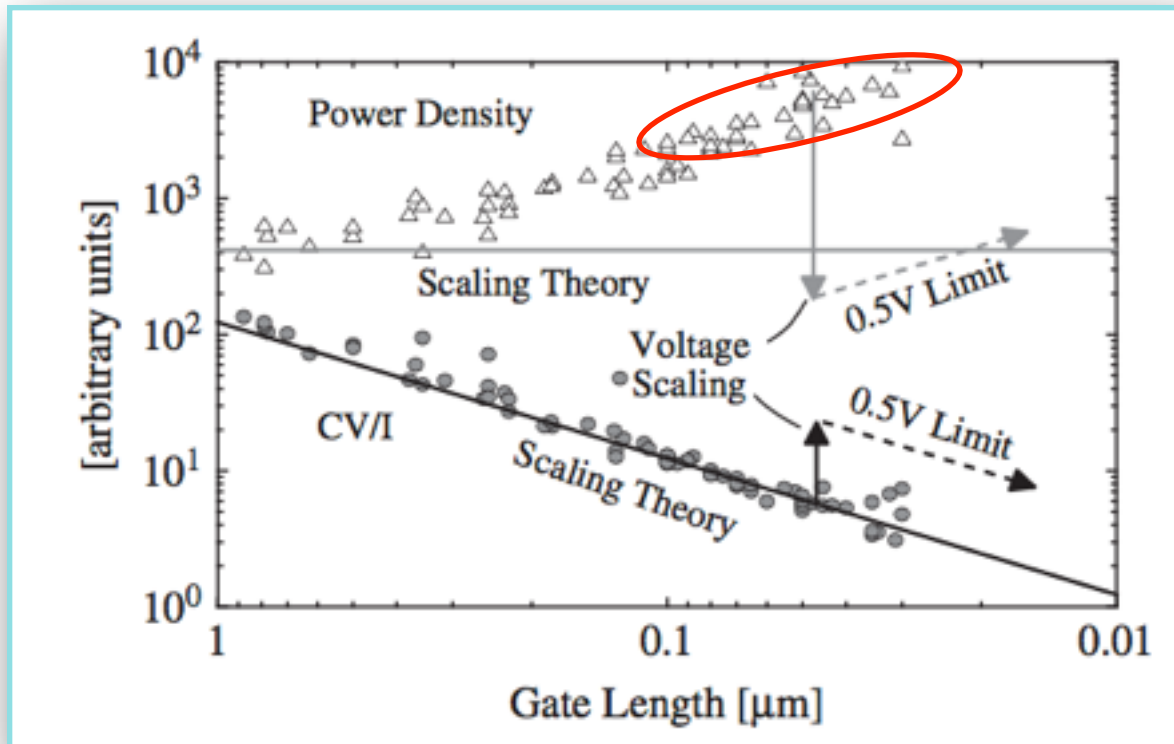
Problem med Dennardskalningen

- Matningsspänningen har inte skalats lika hårt, mer som $1/\sqrt{\lambda}$.
- Matningsspänningen slutade i praktiken skalas för tio år sedan.
 - Termiskt brus ($kT/q = 25$ mV vid rumstemperatur)
 - Subtröskelläckning (effektförbrukning, termiska problem)



Problem med Dennardskalningen

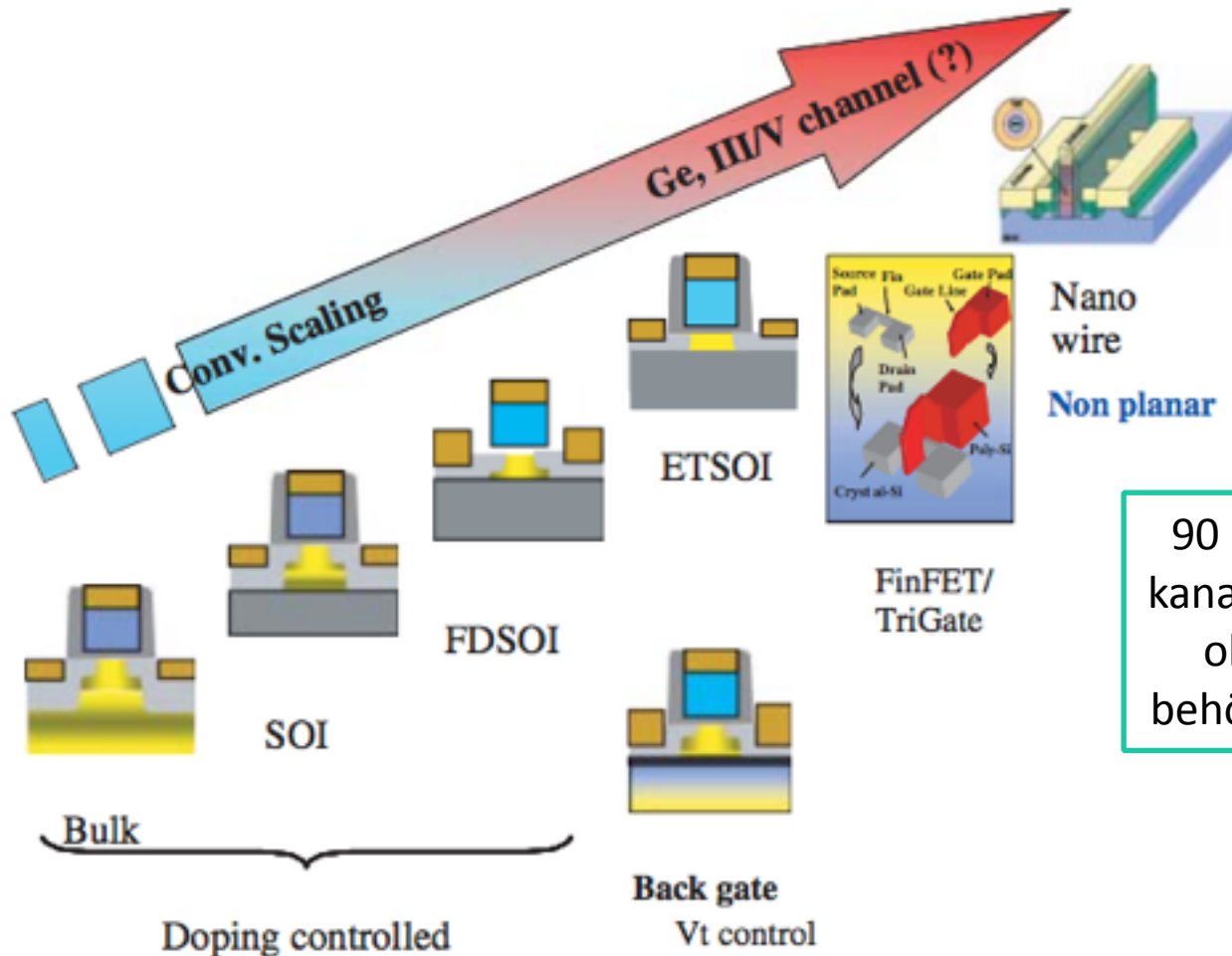
- Effektförbrukningen begränsar möjligheten till skalning ned/upp
- Ökad klockhastighet leder till ökad effektförbrukning



Bortom Dennard, 2005-

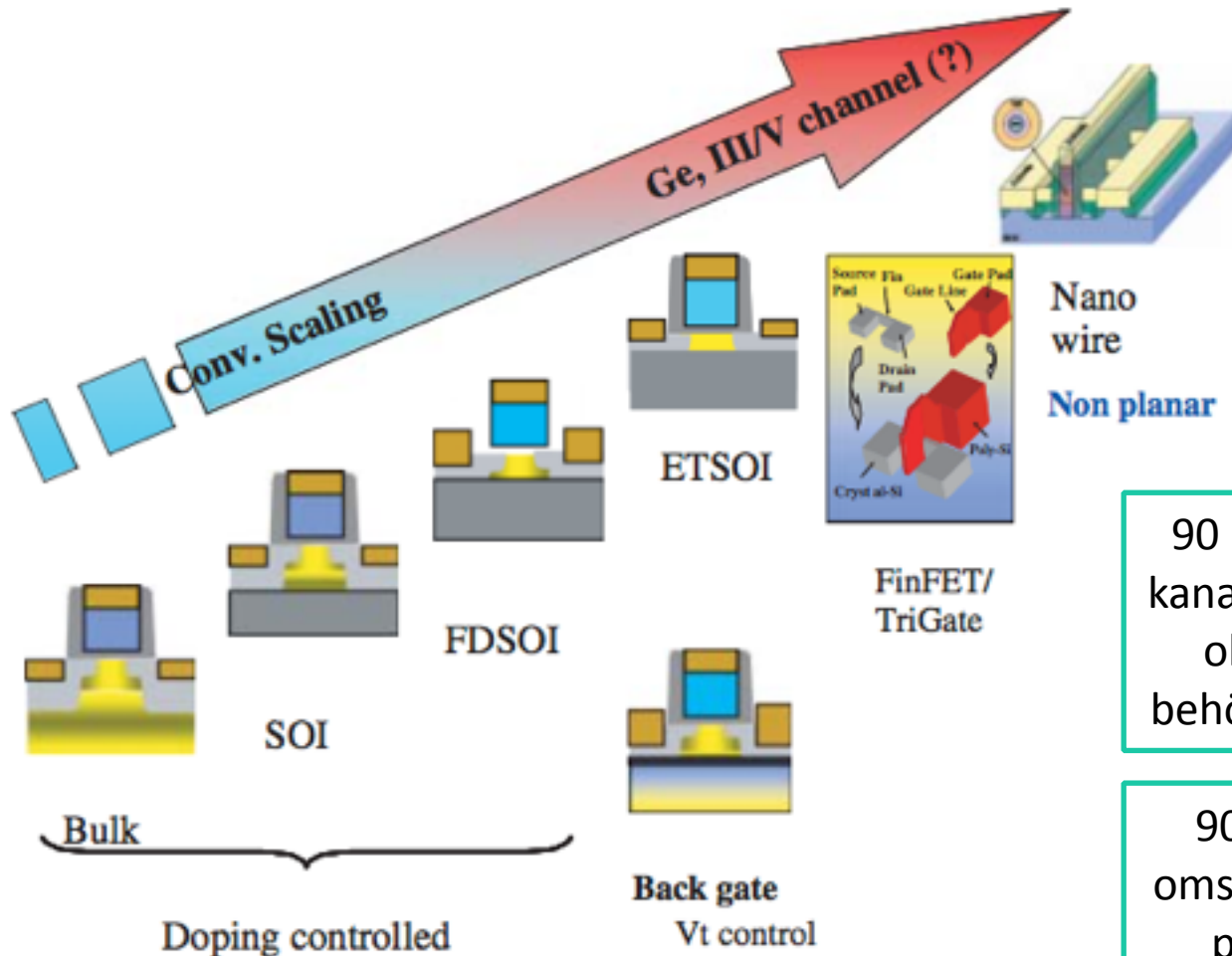
- Krympning i dag:
 - fler transistorer/chip eller lägre kostnad/funktion,
 - tillverkningskostnaden samma per ytenhet,
 - ej (nödvändigtvis) högre prestanda per komponent.
- Fokus på processorer med multipla kärnor men med mindre effektiv skalning.
- Ingen ytterligare höjning av klockfrekvenser; runt 4 GHz är vad som realistiskt kan klaras av pga. termiska begränsningar.
- Konstruktionslösningar för att spara ström: dynamisk skalning av klockfrekvens, delar av chip stängs av när de inte behövs, "Dark silicon" (hela chippet kan inte köras på en gång pga. termiska restriktioner).

Skalning förbi 130 nm: nya koncept



90 nm: mekanisk spänning i kanalen (högre mobilitet, men olika tecken på spänning behövs för NMOS och PMOS).

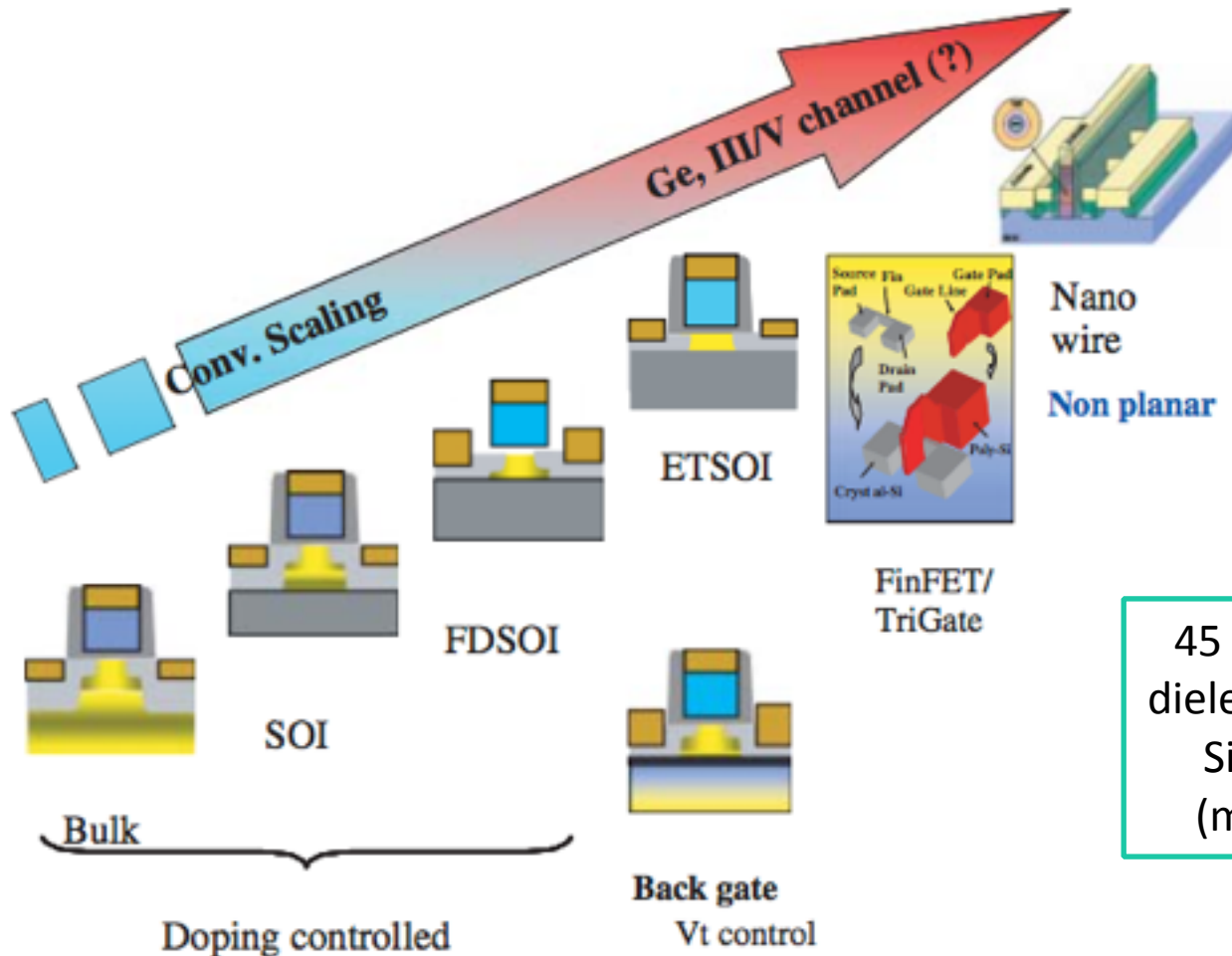
Skalning förbi 130 nm: nya koncept



90 nm: mekanisk spänning i kanalen (högre mobilitet, men olika tecken på spänning behövs för NMOS och PMOS).

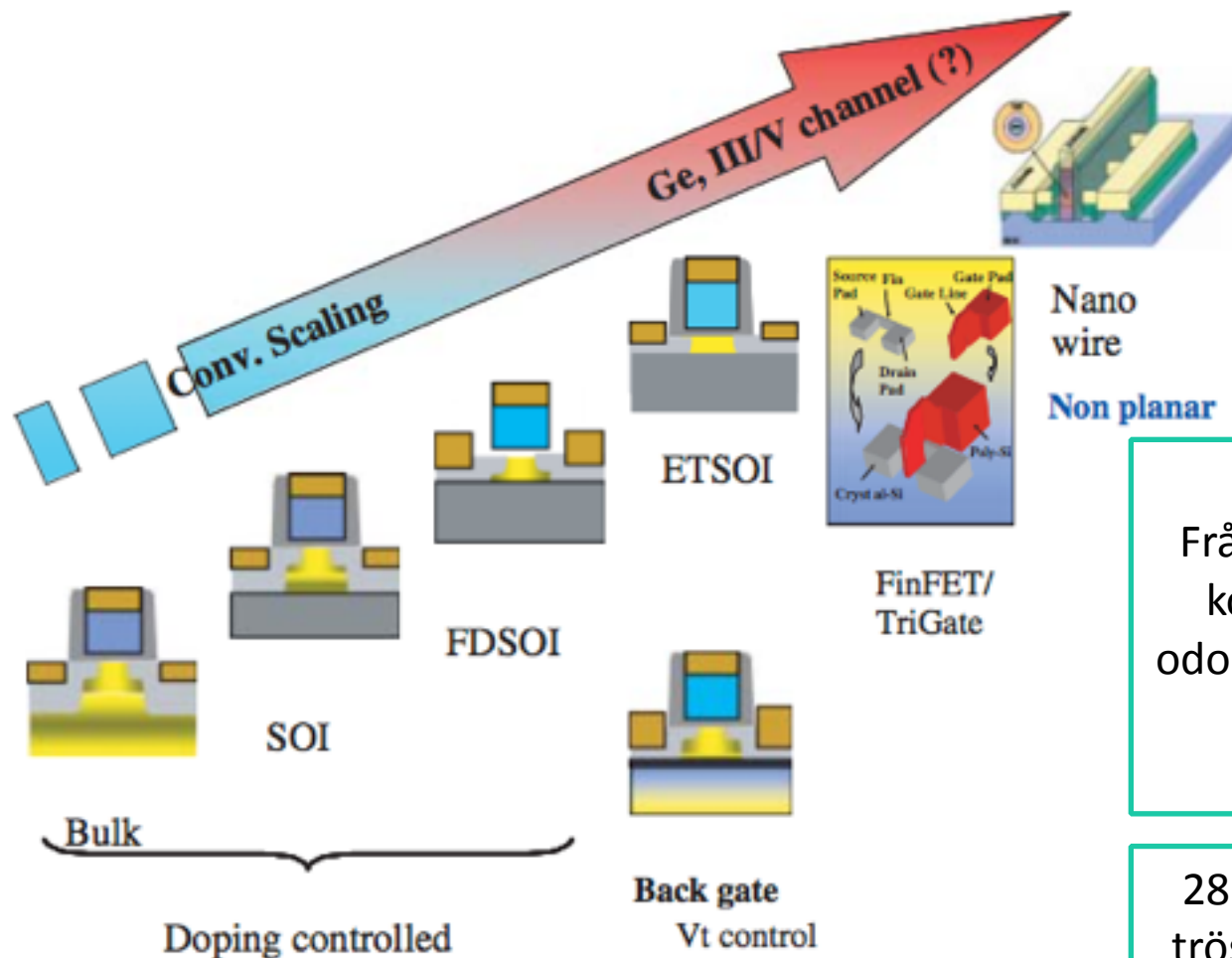
90 nm: PD-SOI (minskade omslagstider motsvarande en processnod men dyrare substrat).

Skalning förbi 130 nm: nya koncept



45 nm: Material med högre dielektricitetstal börjar ersätta SiO₂ som isolator i styret (minskade läckströmmar)

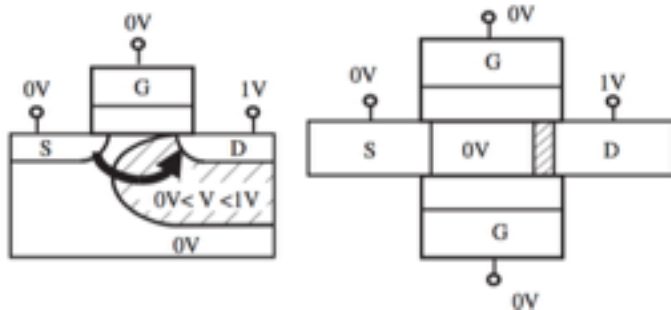
Skalning förbi 130 nm: nya koncept



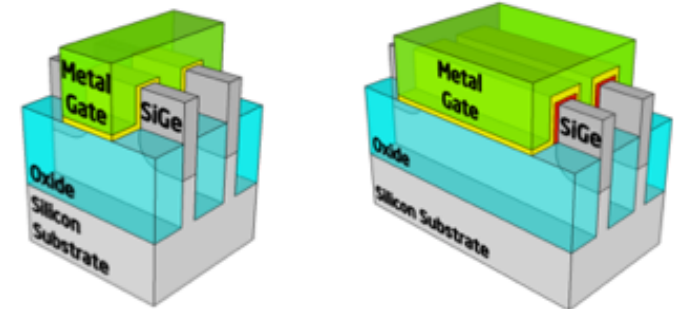
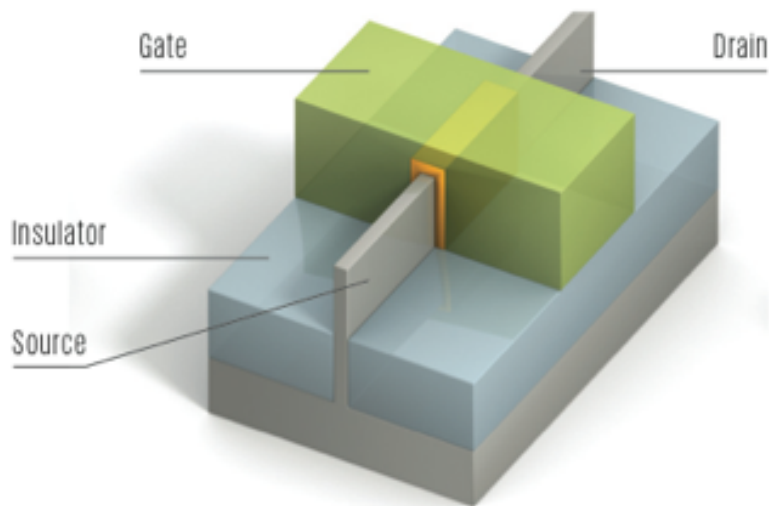
28 nm: FD-SOI
Från dopningskontrollerade komponenter till en tunn odopad kanal vars egenskaper ges av tjocklekar och baksidesspänning

28 nm: Metallstyre (mindre tröskelspänningsvariationer)

22 nm: Tri-Gate eller FinFET



FINFET ADVANTAGES	
PARAMETER	DETAILS
Power	Much lower power consumption allows high integration levels. Early adopters reported 150% improvements.
Operating voltage	FinFETs operate at a lower voltage as a result of their lower threshold voltage.
Feature sizes	Possible to pass through the 20nm barrier previously thought as an end point.
Static leakage current	Typically reduced by up to 90%
Operating speed	Often in excess of 30% faster than the non-FinFET versions.

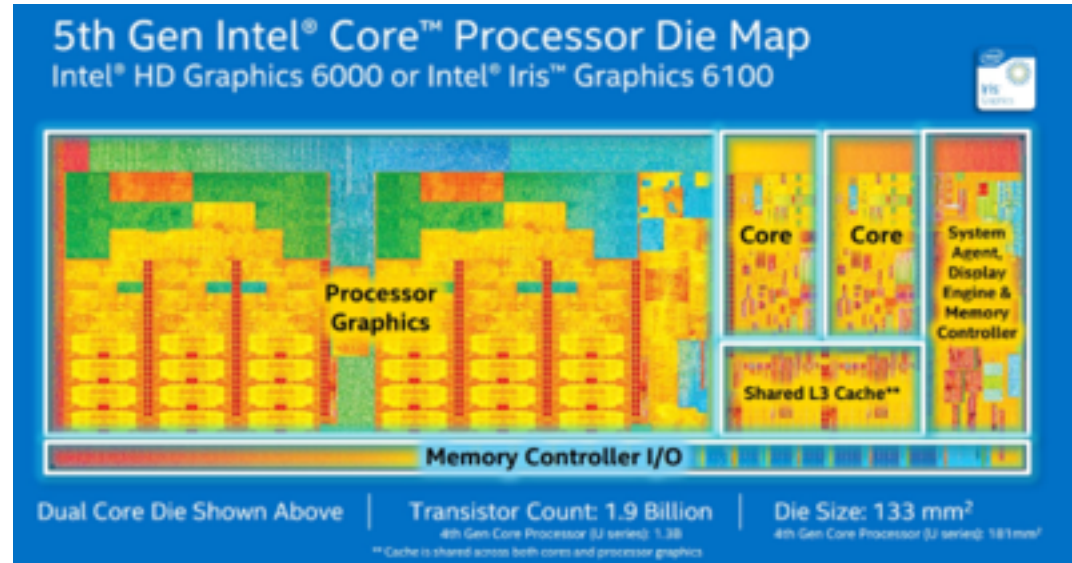


(a) High Speed (HP/SP) and Low Power Logic (LP/ULP)

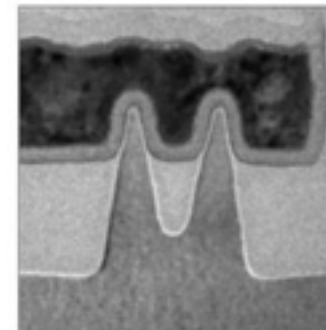
(b) High Voltage (TG)

Intel 22 nm med utvidgningar för SoC design (Jan et al., IEDM 2012)

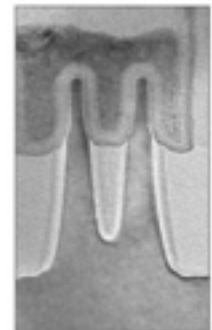
Denna dator: 14 nm FinFET (2*i7@3.1 GHz)!



- 2nd generation Tri-gate transistors
- 42 nm fin pitch
- 70 nm gate pitch
- 52 nm interconnect pitch
- .0588 μm^2 SRAM cell



22 nm 1st Generation
Tri-gate Transistor

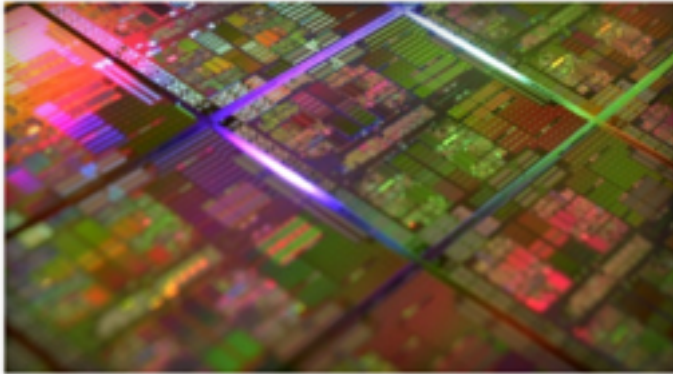


14 nm 2nd Generation
Tri-gate Transistor

Intel 2015: 10 nm försenas till 2017

Intel confirms 10nm delayed to 2017, will introduce 'Kaby Lake' at 14nm to fill gap

By Joel Hiruka on July 16, 2015 at 8:30 am | 52 Comments



Share This article



Intel dropped a bombshell during its Q2 2015 conference call today. The company's sales were in line with reduced expectations, at \$13.2 billion revenue, down 5%

year-on-year. Revenue rose 3% compared to Q1, with slightly better gross margins compared to previous expectations (62.5%, above the expected 56%). PC sales revenue fell 14%, but Intel's tablet business shipped 9.9 million devices, up 11% year-on-year. Profits in the data center group also rose significantly, to \$3.9 billion (up 10% year-on-year).

What most are likely to notice, however, is the announcement that Intel's 10nm hardware will be delayed. Intel CEO Brian Krzanich **told investors** the following: "The last two technology transitions have signaled that our cadence today is closer to 2.5 years than two.

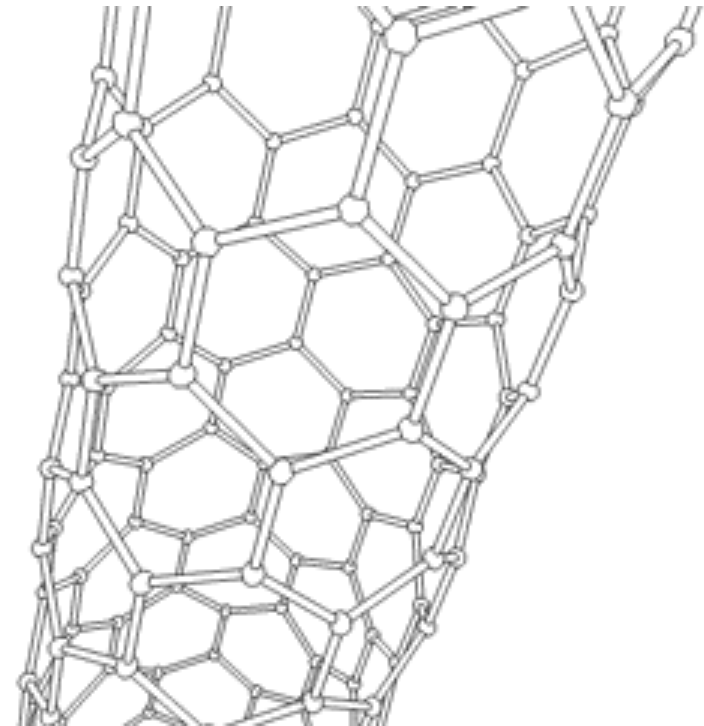
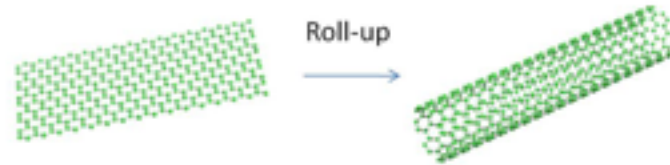
- Intel har skjutit på introduktionen av nya processorer i 10 nm till 2017. Man ser inte ökad prestanda.
- Andra företag har demonstrerat FinFET:ar vid 10 nm och 7 nm, men inte i produktion.
- Frågan är fortfarande öppen hur långt ned i dimensioner FinFET:en fungerar och när man behöver ersätta den med nya koncept.

Nya kanalmaterial och komponenter

- Krav
 - Skall passa in i nuvarande fab-infrastruktur
 - Arbeta med mindre än 500 mV matning
 - Ha potential för fortsatt prestandaökningar
- På "heta listan":
 - Kolnanotrådar
 - Grafén
 - Spinnkomponenter

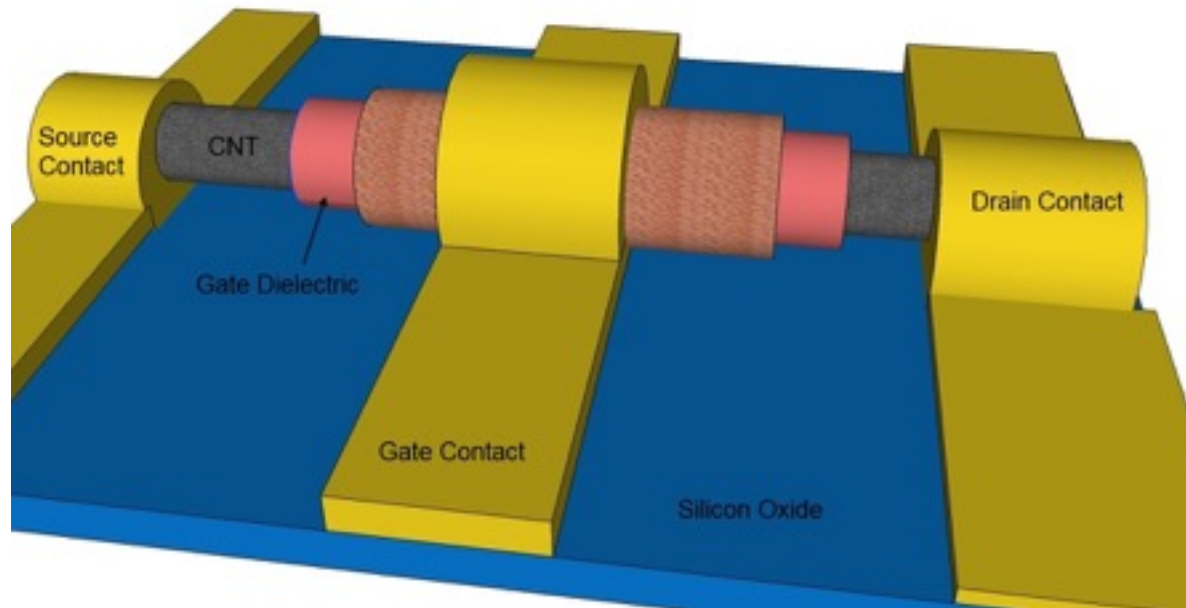
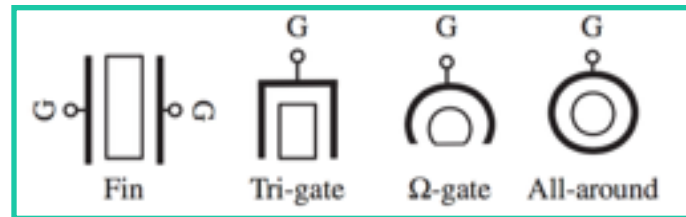
Kolnanotrådar

En kolnanotråd är väsentligen en rulle grafén



- Demonstrerat ned till 7 nm
- Tros gå att skala ned till 1.8 nm (IBM)
- CMOS-kompatibelt
- Bandgap beror bl.a. på diameter
- Ingen kantspridning (kvasi-1D material)
- Kemiskt inert
- Kan hantera höga strömmar
- God värmeledare
- Låg omslagningsenergi i en omkopplare

Kontakter och styret: utmaningar!



Metro 2000-09-21

Snart kan tekniken inte bli mindre

Ericsson oroas av krympande komponenter

35 nm!
(radio)

2015!

På Ericsson räknar man med att kunna fortsätta förminska sin elektronik utan större problem i åtminstone 15 år till.

Ju mindre elektroniska komponenter, desto fler och snabbare tjänster får man plats med i en produkt. Detta leder i sin tur till ökade förtjänster.

Ted Johansson är expert på kretstillverkning på Ericssons

utvecklingsavdelning i Kista. Han är inte speciellt orolig för framtiden och tycker forskarna dramatiserar elektronikens fysiska gräns en del.

– Visst, det är sant att atomerna flyttar sig från sitt läge om man börjar laborera med alltför små komponenter, men vi är inte där ännu. I dag är våra minsta komponenter i storleksordningen 180 till 250 nanometer.

–SIA, som är något av global branschorganisation för kretstillverkare, har tagit fram en studie som visar att man lugnt kan fortsätta förminska elektroniken i samma takt som hittills fram till och med år 2015. Då skulle vi vara nere på komponenter i storleksordningen 35 nanometer vilket fortfarande är över den fysikaliska gräns som forskarna talar om, säger Ted Johansson.



Det innebär att Ericsson i framtiden kan tillaga fler och snabbare tjänster till sina produkter utan att behöva öka storleken på de olika komponenterna.

– Så kan det bli, men det är något som jag inte vill säga något om. Det är något som jag inte vill säga något om. Det är något som jag inte vill säga något om.

Ericsson / SIA: 35 nm till 2015

- Atomen är den minsta beståndsdel i alla materier.
- Elektronen är den minsta bärningspartikel som observerats. Den är 100 gånger mindre än en proton.
- Neutroner är en neutron. De är neutrala och har samma storlek som en proton.
- Protoner är en proton. De är positiva och har samma storlek som en neutron.

Källa: Nationella tekniska forskningsrådet

2015: Moores lag fungerar fortfarande!

1965: Gordon Moore förutsäger att hans observation kan nog hålla i tio år, till 1975.

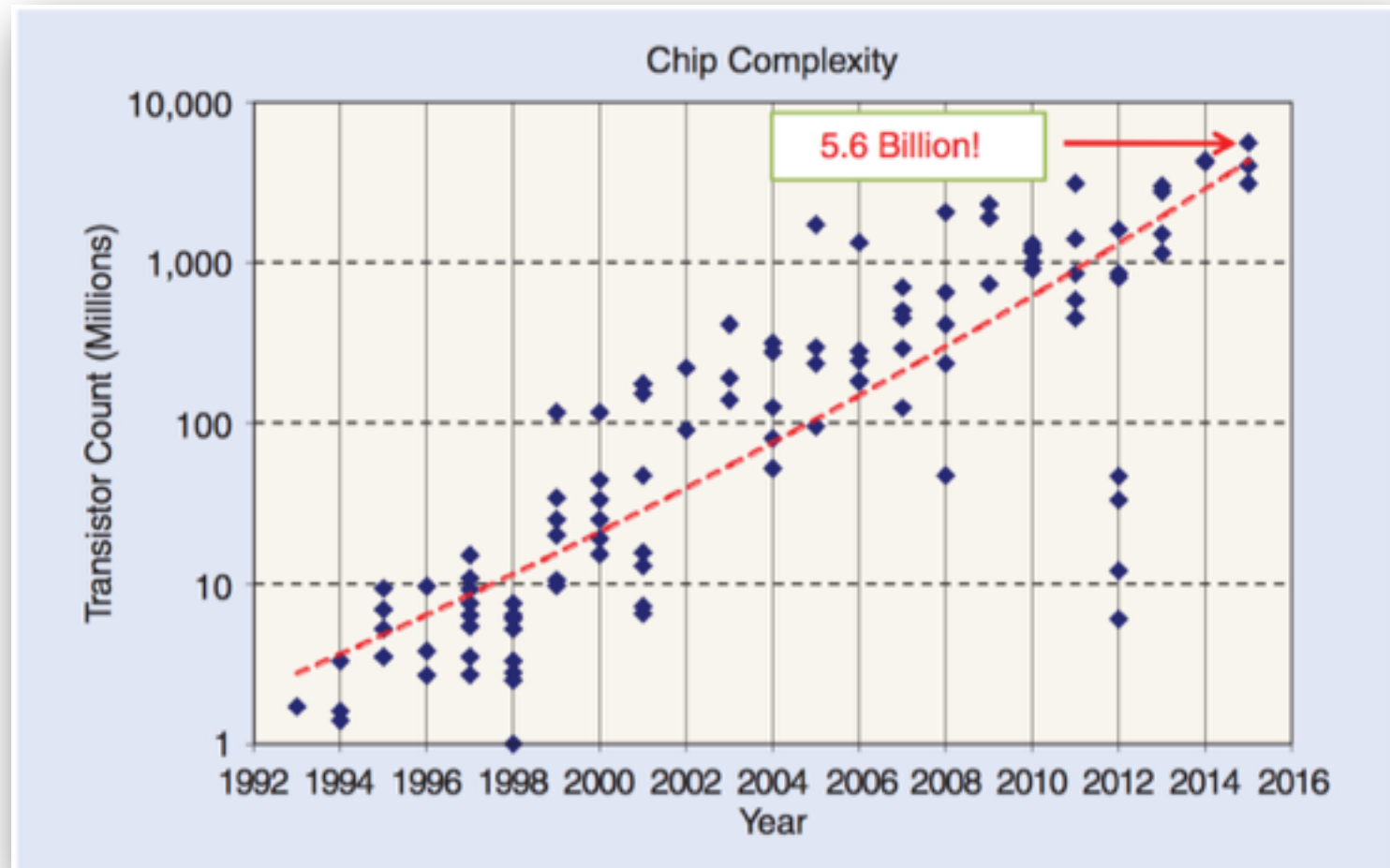


2015: Gordon Moore förutsäger att hans observation kan nog hålla *ytterligare* tio år, till 2025!



Antal transistorer per chip

ISSCC 1970-2015:
fördubbling på 1,5 år

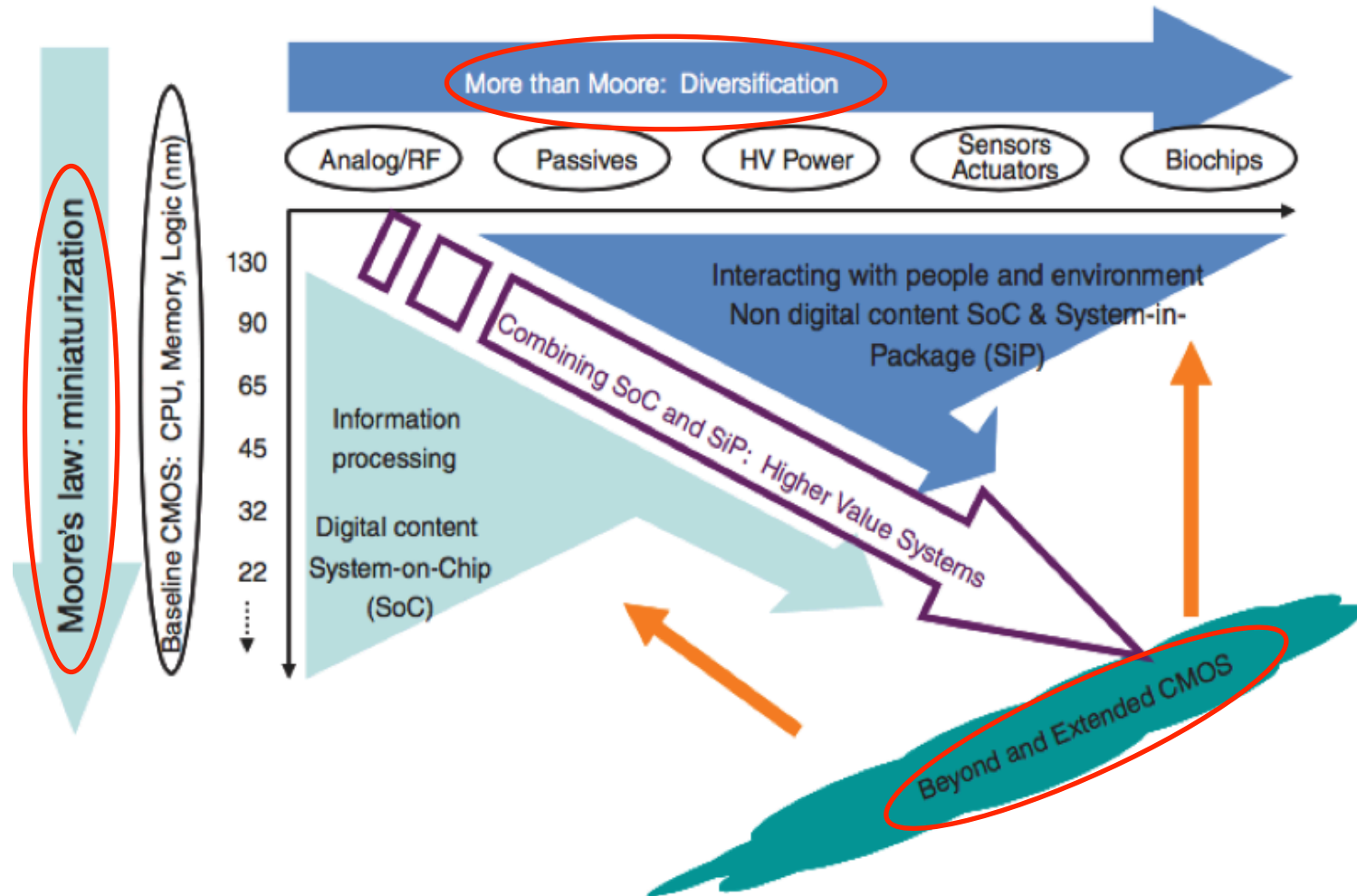




Year of Production	2013	2015	2017	2019	2021	2023	2025	2028
Logic Industry "Node Name" Label	"16/14"	"10"	"7"	"5"	"3.5"	"2.5"	"1.8"	
Logic ½ Pitch (nm)	40	32	25	20	16	13	10	7
Flash ½ Pitch [2D] (nm)	18	15	13	11	9	8	8	8
DRAM ½ Pitch (nm)	28	24	20	17	14	12	10	7.7
FinFET Fin Half-pitch (new) (nm)	30	24	19	15	12	9.5	7.5	5.3
FinFET Fin Width (new) (nm)	7.6	7.2	6.8	6.4	6.1	5.7	5.4	5.0
6-t SRAM Cell Size(µm ²) [@60f2]	0.096	0.061	0.038	0.024	0.015	0.010	0.0060	0.0030
MPU/ASIC HighPerf 4t NAND Gate Size(µm ²)	0.248	0.157	0.099	0.062	0.039	0.025	0.018	0.009
4-input NAND Gate Density (Kgates/mm ²) [@155f2]	4.03E+03	6.37E+03	1.01E+04	1.61E+04	2.55E+04	4.05E+04	6.42E+04	1.28E+05
Flash Generations Label (bits per chip) (SLC/MLC)	64G /128G	128G /256G	256G / 512G	512G / 1T	512G / 1T	1T / 2T	2T / 4T	4T / 8T
Flash 3D Number of Layer targets (at relaxed Poly half pitch)	16-32	16-32	16-32	32-64	48-96	64-128	96-192	192-384
Flash 3D Layer half-pitch targets (nm)	64nm	54nm	45nm	30nm	28nm	27nm	25nm	22nm
DRAM Generations Label (bits per chip)	4G	8G	8G	16G	32G	32G	32G	32G
450mm Production High Volume Manufacturing Begins (100Kwspm)				2018				
Vdd (High Performance, high Vdd transistors)[**]	0.86	0.83	0.80	0.77	0.74	0.71	0.68	0.64
I/(CVT) (1/psec) [**]	1.13	1.53	1.75	1.97	2.10	2.29	2.52	3.17
On-chip local clock MPU HP [at 4% CAGR]	5.50	5.95	6.44	6.96	7.53	8.14	8.8	9.9
Maximum number wiring levels [unchanged]	13	13	14	14	15	15	16	17
MPU High-Performance (HP) Printed Gate Length (GLpr) (nm) [**]	28	22	18	14	11	9	7	5
MPU High-Performance Physical Gate Length (GLph) (nm) [**]	20	17	14	12	10	8	7	5
ASIC/Low Standby Power (LP) Physical Gate Length (nm) (GLph)[**]	23	19	16	13	11	9	8	6

** Note: from the PIDS working group data; however, the calibration of Vdd, GLph, and I/CV is ongoing for improved targets in 2014 ITRS work

Moore's lag i flera dimensioner



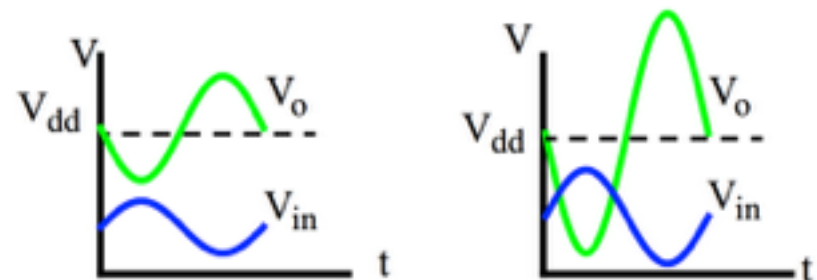
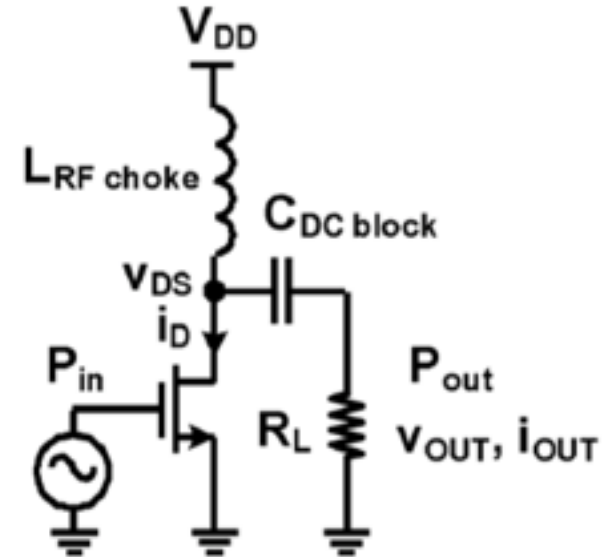
Moore's lag och radiokrets konstruktion

- Processnod för de flesta radiokretsar 2015 är 32/28 nm på bulk eller FD-SOI.
- Processer mer än tillräckligt snabba för trådlös kommunikation upp to 6 GHz (mobil, trådlösa nätverk, etc.), men även för 60 och 100+ GHz.
- Krav på hög integration gör att processer mindre lämpade för radio (för liten processnod) ändå måste användas.
- Utmaningar med radiokrets konstruktion i skalad CMOS:
 - kortkanalsbeteende,
 - parametervariationer,
 - parasiter,
 - 1/f-brus,
 - begränsade matnings- och genombrottsspänningar.

Effektförstärkarkonstruktion i skalad CMOS för radio

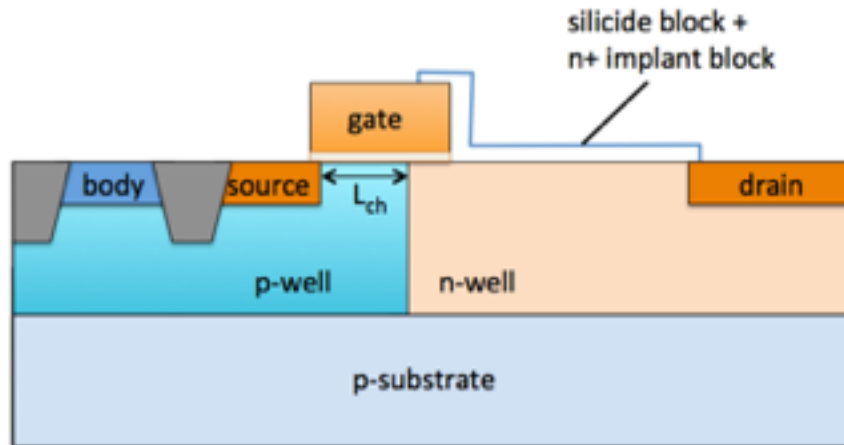
- Linjära PA (klass A, AB, ...) är de vanligast förekommande för effektförstärkning av radiosignaler.
- Nackdel: 2*matningen över transistorn.
- Uteffekter över 30 dBm (1 W) intressanta.
- Hög uteffekt kan nås med stora komponenter (obs. impedansen) och hög matningsspänning.

$$P = \frac{V^2}{2R}$$



Hur hanterar vi hög matningsspänning?

Komponentlösningar/nya strukturer



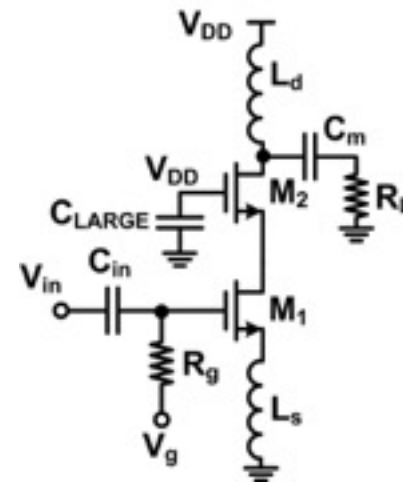
LDMOS structure with no additional process steps or masks*

Utformad i Global Foundrys 65 nm CMOS-process, avsedd för WLAN. Skalbart till 45 nm och 32 nm. >32 dBm @ 2.45 GHz.

T. Johansson et al., EuMIC 2013

Kretslösningar: stapling av komponenter

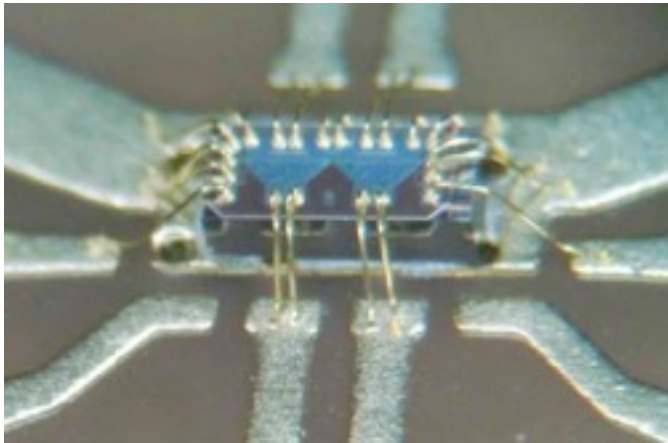
Kaskodkopplingen vanligast:



Spänningen dock inte jämnt delad mellan transistorerna (förbättrade varianter finns).

WLAN PA

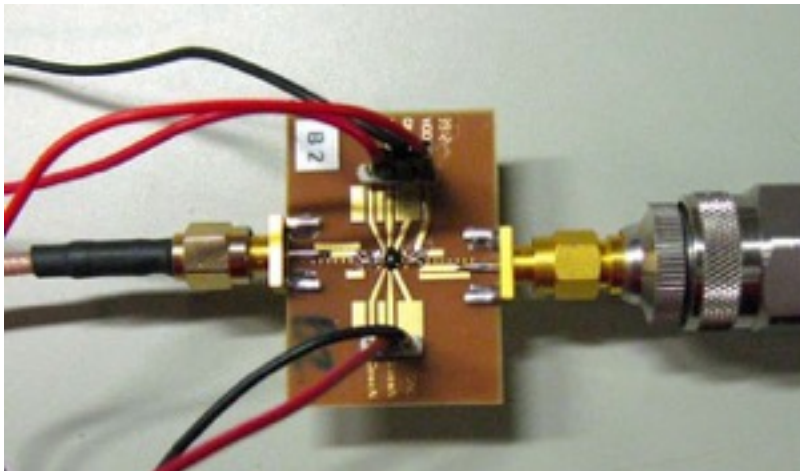
- Transistors with $2=5.6$ mm mounted on PCB



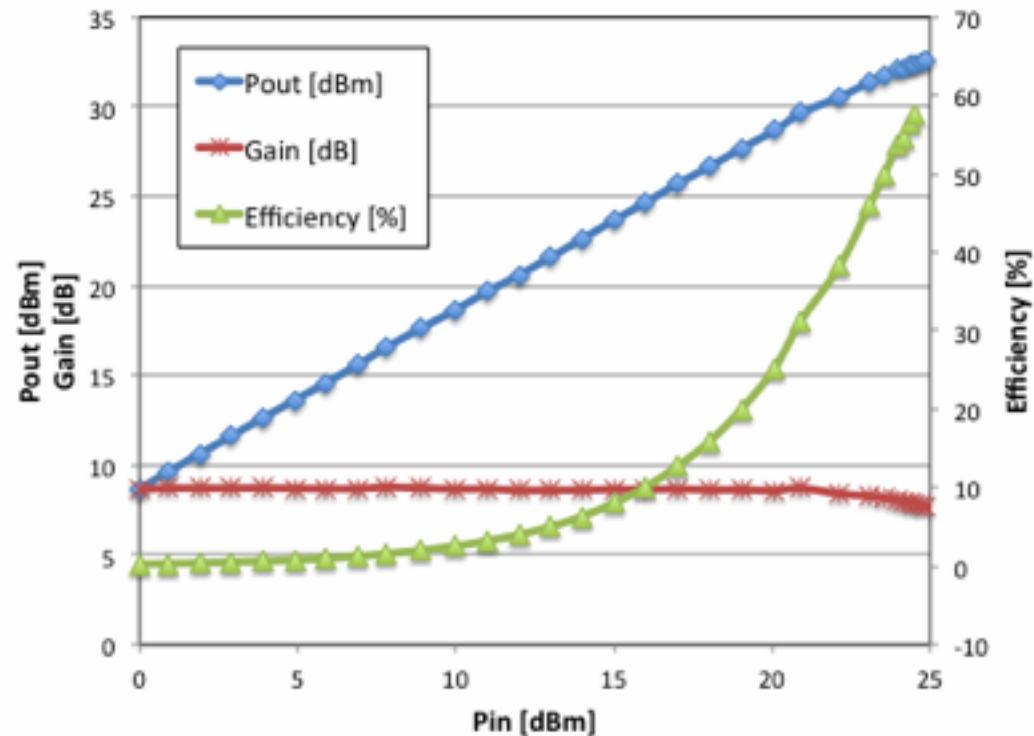
Differential PA, $V_{dd}=3$ V, $f=2412$ MHz

P-1dB = 32,5 dBm (1,8 W).

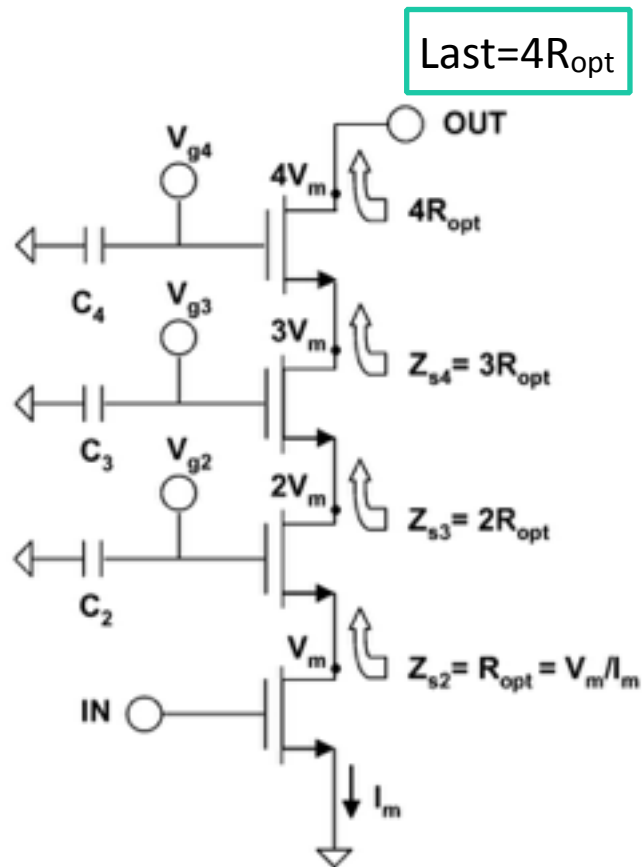
Class AB, efficiency over 50 % for unmodulated signal.



EDMOS $f=2412$ MHz



Transistorstapling



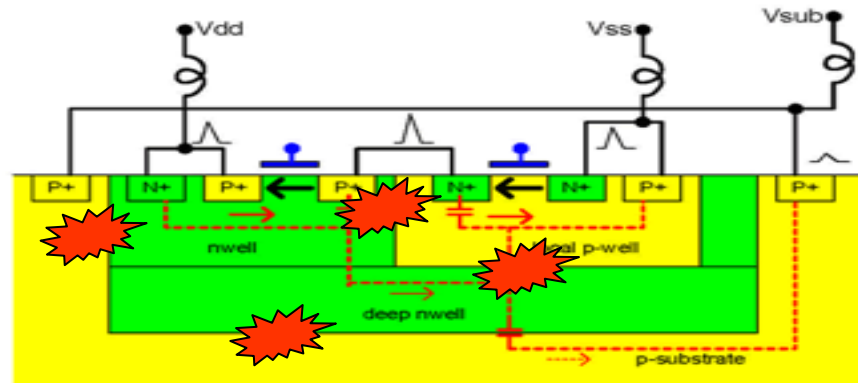
C_2, C_3, C_4 set Z_{s2}, Z_{s3}, Z_{s4}

$$Z_{si} = \left(1 + \frac{C_{gs}}{C_i} \right) \cdot \left(\frac{1}{g_m} \parallel \frac{1}{sC_{gs}} \right)$$

$$\approx \left(1 + \frac{C_{gs}}{C_i} \right) \cdot \frac{1}{g_m}, \quad \text{for } f_0 \ll F_t.$$

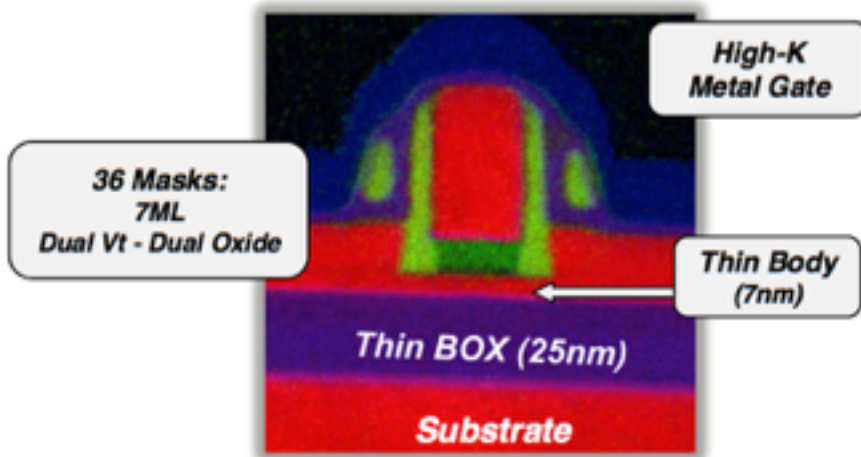
I praktiken begränsat till fyra staplade transistorer
Chen et al., JSSC 2013

Begränsningar för maximal matningsspänning



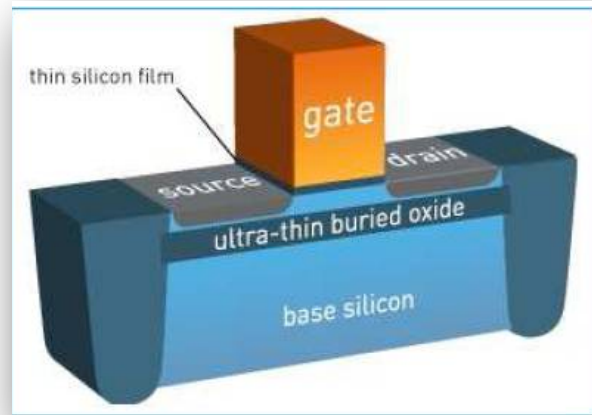
- Konventionell bulk-CMOS: många diodgenombrott till fickor (well) och substrat.
- Skalad bulk-CMOS: genombrott ned mot 4-5 V.
- Staplade bulk-komponenter (PA): begränsade av genombrottet drain-substrat av komponenten högst upp i staplingen.
- Med SOI-komponenter så finns inga genombrott mot substratet. Möjligt att stapla komponenter utan att ta hänsyn till genombrott.

28 nm FD-SOI (UTBB) (ST Microelectronics)



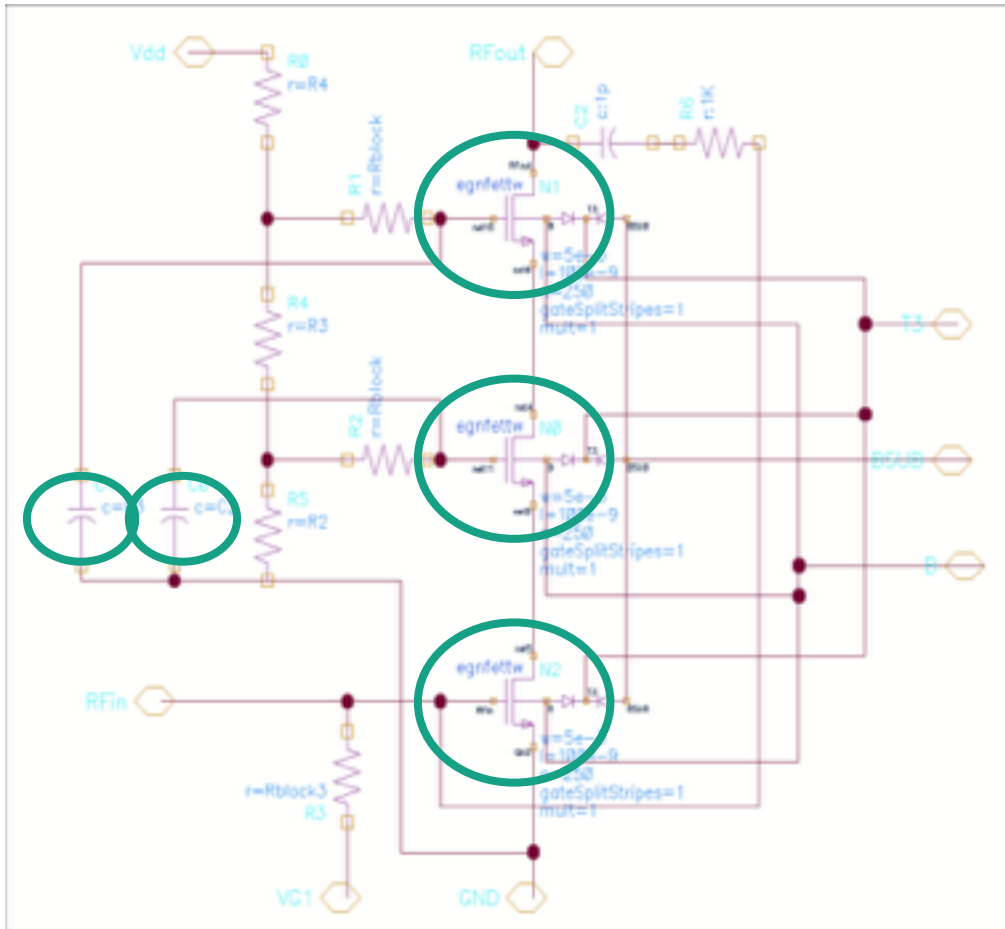
$L_g=24$ nm, $T_{ox}=1.8$ nm, $V_{sup}=1.0$ V
 ultra-thin silicon: 7 nm
 ultra-thin buried oxide: 25 nm

High-k dielectric
 Metal-gate electrode
 S/D: epitaxy raised
 Undoped channel
 Bulk/SOI integration



För staplad PA-konstruktion:
 $L_g=150$ nm, $T_{ox}=2.8$ nm,
 $V_{sup}=1.8$ V (+10 %)

3-staplad PA med hög uteffekt i 28 nm FD-SOI



$W = 6000 \text{ um}$ ($10 \text{ um} * 10 * 60 \text{ cells}$)

$V_{dd} = 3.0 \text{ V}$

Class-AB

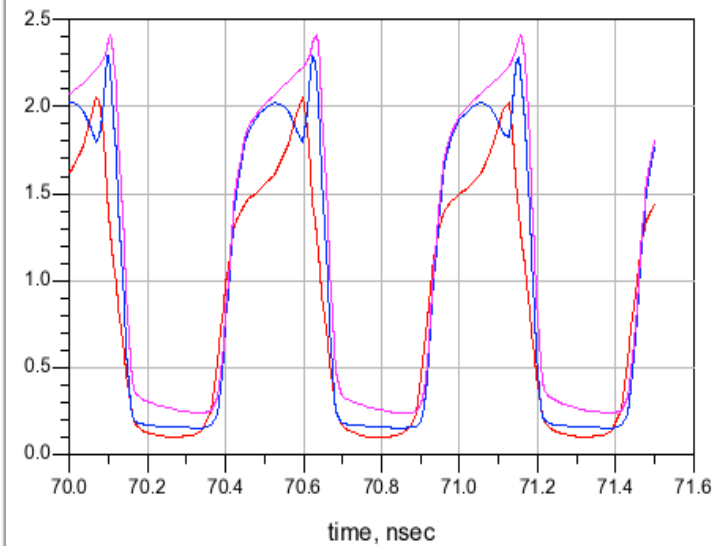
$f = 1900 \text{ MHz}$

$Z_{in} = 0.49 + j*7.1 \text{ } \Omega$

$RL = 7 \text{ Ohm}$

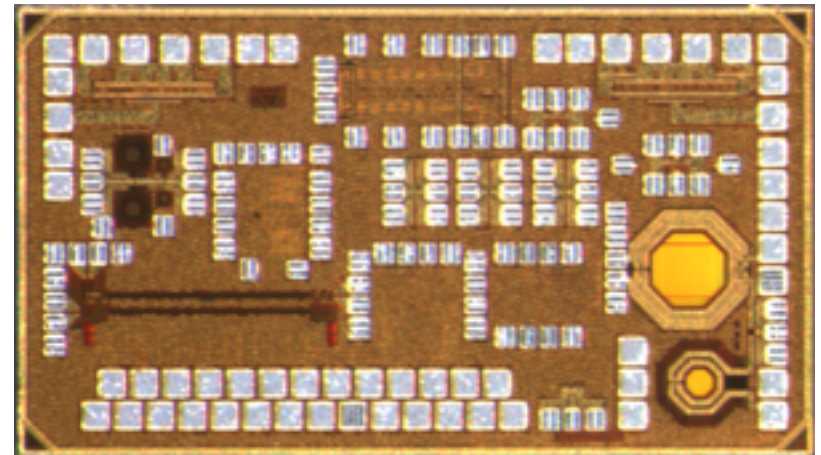
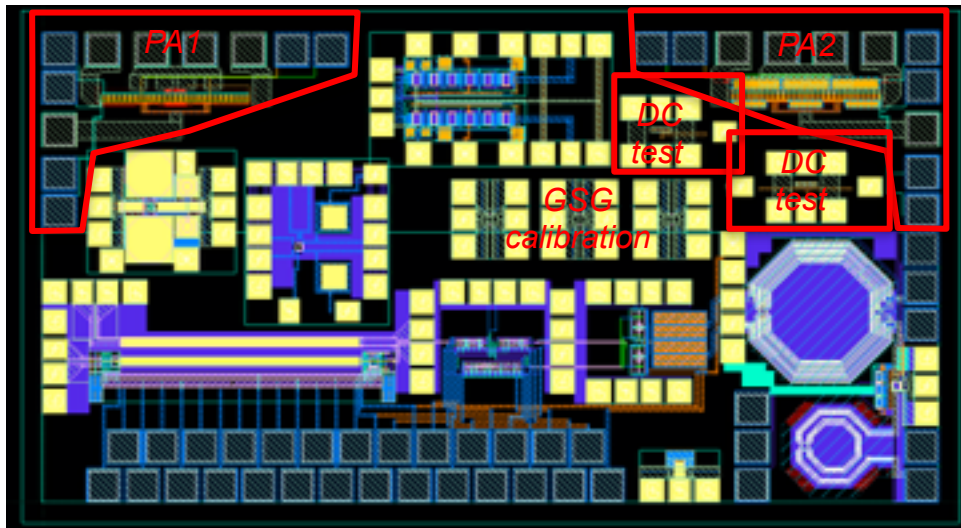
$C2 = 4 \text{ pF}$, $C3 = 1 \text{ pF}$

$P_{-1dB} = 28.9 \text{ dBm}$



3-staplad PA med hög uteffekt i 28 nm FD-SOI

- Med Acreo Norrköping
- Yta 1.5 x 2.2 mm
- Kostnad 45 k€
- Under utvärdering



A Review of Watt-Level CMOS RF Power Amplifiers

Ted Johansson, Senior Member, IEEE, and Jonas Fritzin, Member, IEEE

Abstract—This paper reviews the design of watt-level integrated CMOS RF power amplifiers (PAs) and state-of-the-art results in the literature. To reach watt-level output power from a single-chip CMOS PA, two main strategies can be identified: use of high supply voltage and use of matching and power combination. High supply voltage limits are closely related to device design in the fabrication process. However, the maximum operating voltage can be improved by amplifier class selection, circuit solutions, and process modifications or mask changes. High output power can also be reached by the use of on-chip matching and power combination, commonly using on-chip transformers. Reliability often sets the limits for the PA design, and PA degradation mechanisms are reviewed. A compilation of state-of-the-art published results for linear and switched watt-level PAs, as well as a few fully integrated CMOS PAs, is presented and discussed.

Index Terms—CMOS power amplifiers (PAs), integration, system-on-chip (SoC).

I. INTRODUCTION

A. CMOS for Wireless System-on-Chip (SoC)

THE WIRELESS market has experienced a remarkable development and growth since the introduction of the first modern mobile phone systems, with a steady increase in the number of subscribers, new application areas, and higher data rates. Much of these advancements are due to successful high-level integration of the electronic circuitry in low-cost technologies. To continue this development, we need full integration of the RF, analog, and digital parts that constitutes a modern radio into SoC radios. Only modern CMOS technology has the potential to do this.

CMOS has for a long time been the choice for digital integrated circuits due to its high level of integration, low cost, and constant enhancements in performance. Due to the significant scaling of MOS transistors, the transition frequency has reached well beyond 100 GHz [1] and CMOS technology have become popular in RF applications.

During the last decade, considerable effort has been spent on researching Si- and CMOS-based RF integrated circuits (RFICs) for wireless handheld applications [2]–[5]. The digital baseband circuits have now successfully been integrated in

CMOS, as well as most of the radio-building blocks. To lower the cost and to achieve complete integration of a radio SoC, it is desirable to also integrate the power amplifier (PA) in a single CMOS chip [6]–[10]. Whereas digital circuits benefit from the technology scaling, it is becoming harder for the radio, and especially the PA, to meet requirements on linearity, output power, bandwidth, and efficiency using the low supply voltages that follow from technology scaling. However, the almost-for-free integration of CMOS opens up possibilities for new PA architectures.

For the PA, the path to the fully integrated SoC can be seen as a two-step process. The first step is the standalone integrated CMOS PA, using as few external components as possible, fabricated in the same technology as the SoC. The first watt-level fully integrated CMOS PA, with on-chip matching to 50 Ω , was published in 2001 [11] using a transformer power combination technique known as distributed active transformers (DATs), and linear PAs blocks. A literature survey of published CMOS PA results [9] shows reported output powers of about 33–34 dBm (2–2.5 W) at 1–2 GHz, about 20 dBm (0.1 W) at 5–6 GHz, and then dropping to below 20 dBm at higher frequency. Section V in this paper contains more detailed compilations of different architecture watt-level CMOS PAs, but the findings are similar.

The second step is to integrate the PA with the baseband radio SoC and solve the problems caused by the integration. For communication standards with peak output power less than 30 dBm, complete SoCs are common in products today, such as wireless local area networks (WLANs) [12]–[14], shared Bluetooth and WLAN [15], as well as digitally enhanced cordless telecommunications (DECT) [16]. They include integrated PAs, however most of them are not delivering maximum allowed output power in accordance with the standards.

For cellular handsets, SoCs with full output power are virtually nonexistent. However, a third-generation (3G) RF transceiver with an integrated PA in 65 nm was recently presented by the Intel Corporation [17] although detailed specifications have not been released. Standalone second-generation (2G) handset integrated CMOS PAs have been commercially available on the market for a number of years [18]–[21]. For 3G (WCDMA) PAs, the groundbreaking work has been done by startup companies, such as Amalix Semiconductor (now acquired by RFMD), Black Sand Technologies [22], and Avicel Semiconductor (now acquired by Avago) [23], [24]. Standalone 3G PAs are now available on the market. The first CMOS PA capable of 4G (LTE) operation at all bands was recently presented [25].

Due to the low breakdown voltages for fast CMOS devices, other technologies, such as GaAs HBT [26], [27], Si bipolar [28], [29], SiGe HBT [10]–[32], and low-voltage LDMOS [33], [34] have thus far dominated the small-size PAs. See [33] for CMOS versus GaAs comparison for mobile phone PAs, and [36]

T. Johansson and J. Fritzin, "A Review of Watt-level CMOS RF power amplifiers", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 62, Issue 1, pp. 111-124, 2014.

Manuscript received July 28, 2013; accepted November 16, 2013. Date of publication December 11, 2013; date of current version January 06, 2014.

T. Johansson is with the Division of Electronic Devices, Department of Electrical Engineering, Linköping University, SE-58183 Linköping, Sweden (e-mail: ted@isy.liu.se).

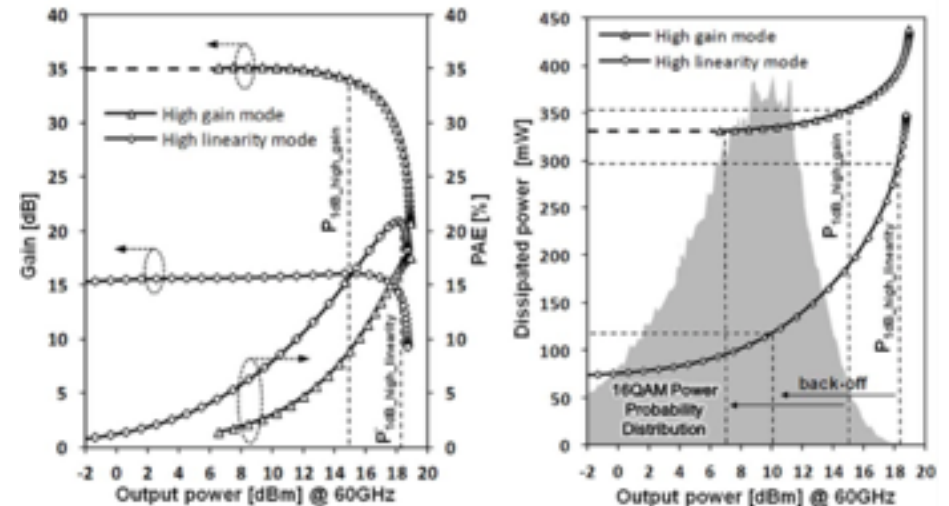
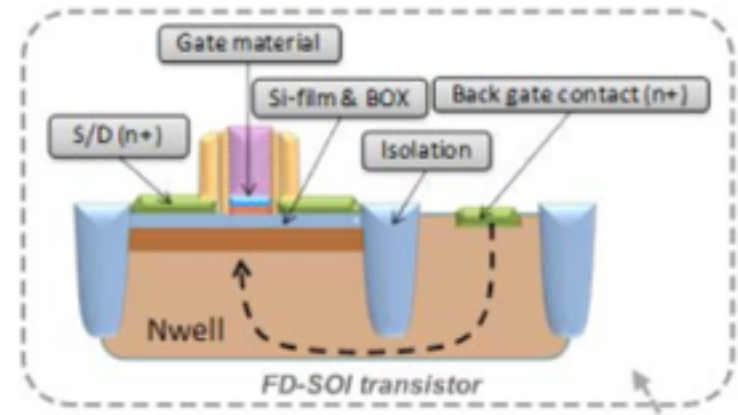
J. Fritzin is with the Division of Electronic Devices, Department of Electrical Engineering, Linköping University, SE-58183 Linköping, Sweden. He is now with Intel Mobile Communications GmbH, DE-81579 Neuberg, Germany (e-mail: jonas.fritzin@intel.com).

Digital Object Identifier 10.1109/TMTT.2013.2292608

0018-9480 © 2013 IEEE

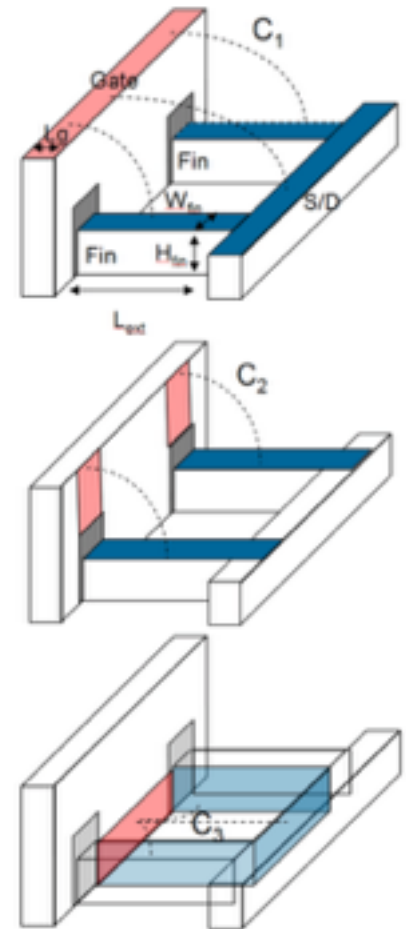
UTBB body biasing: dynamisk ändring av V_T

- PA med valbar hög förstärkning/hög linjaritet
- 28 nm FD-SOI (STM)
- Doherty PA @ 60 GHz
- 1 V matning
- Förstärkning: 35/15 dB
- Max linjär uteffekt: 15/18.8 dBm
- 21 % verkningsgrad



FinFET och radio

- Har ej hittat exempel i litteraturen på radiokretsdemonstrationer i FinFET, förutom runt 45 nm.
- Komponentsimuleringspapper
- Parasiterkapacitanser viktiga!
- *"similar characteristics in terms of transconductance, Early voltage, voltage gain, self-heating issue but UTBB outperforms FinFET in terms of cutoff frequencies thanks to their relatively lower fringing parasitic capacitances."* (Raskin, "FinFET versus UTBB SOI - a RF perspective", ESSDERC 2015)



Tack för er uppmärksamhet och tid!

Frågor?

www.liu.se