



# Tentamen 31 mars 2005

**Fysik, del C**

**Fasta tillståndets elektronik**

**för D2 (FFY 171)**

**Mikroelektronik;**

**Komponenter, del A**

**för E2 (ETI 145)**

Tentamen äger rum i V-salarna torsdag 31/3 2005 mellan klockan 08.30 och 12.30.

Ansvarig lärare är Per Lundgren, tel. 772 18 82.

Inga tillåtna hjälpmedel mer än skrivutensilier på tentatalen i grupp 1-2. När lösningar till grupp 1 och 2 lämnats in får valfria hjälpmedel (utom levande rådgivare) användas för att bearbeta uppgifterna i grupp 3.

För godkänt krävs 8 av 18 poäng, varav examinationsspoäng från kursen (0-5 poäng) kan vara en del. Dessutom måste man erhålla 5 av maximalt 6 möjliga poäng på de fyra deltalerna i grupp 1 (1a-d), där varje tal kan ge 2 poäng. I grupp 2 kan man erhålla maximalt 2 poäng. Uppgifterna i grupp 3 kan ge 5 poäng vardera. 11-14 totalpoäng ger delbetyg 4, och fler än 14 poäng ger delbetyg 5.

Lösningar anslås fredag 1/4 utanför kontor B509 i MC2.

Preliminära rättningsprotokoll anslås vid respektive linjes (E & D) normala anslagsplatser samt utanför kontor B509 i MC2 senast torsdag 14/4 klockan 12.00.

Granskning av tentamen sker på avdelningen för fasta tillståndets elektronik fredag 15/4 klockan 11.00-13.00.

**Chalmers tekniska högskola**

**Fasta tillståndets elektronik**

**mars 2005**



## GRUPP 1

Deluppgifterna (1a-d) skall lösas utan andra hjälpmedel än skrivdon. Varje deluppgift kan ge 2 poäng. Maximalt 6 poäng kan erhållas totalt från denna grupp och minst 5 poäng krävs för godkänt.

### Uppgift 1a

Rita ett skalenligt energibanddiagram (bandkanter och ferminivå skall finnas med) för en heteroövergång (två olika halvledare som satts ihop – man har låtit det ena växa på det andra) med pålagd spänning. Material 1 har ett bandgap,  $E_g$ , på 1 eV och en elektronaffinitet,  $\chi$ , på 3 eV. För material 2 är  $E_g=3$  eV och  $\chi=1$  eV. Båda materialen är lika hårt p-dopade. Fältstyrkan  $p$  g a en pålagd spänning är sådan att vi får nettohålflöde från material 1 till 2.

### Uppgift 1b

Ström-spänningskaraktistiken i framriktningen för tre olika dioder har modellerats vid rumstemperatur med nedanstående empiriska modeller. Motivera vilken av dioderna som bäst följer ideala diodekvationen!

- 1)  $I=15 \cdot 10^{-9} \cdot e^{19 \cdot V} + 3 \cdot 10^{-13} \cdot e^{41 \cdot V}$ ;
- 2)  $I=7 \cdot 10^{-6} \cdot e^{40 \cdot V}$ ;
- 3)  $V=5 \cdot I + 0,02 \cdot \ln[I/10^{-12}]$ ;

### Uppgift 1c

Du skall försöka komma på vilket ben som är vilket (styre, emitter/source, kollektor/drain och substrat) för en omärkt diskret MOSFET med fyra ben, samt avgöra om det är en n-kanal eller p-kanal transistor. Du kan bara mäta strömmen vid 1 V pålagd spänning mellan två ben i taget. Du får följande resultat (benen kallas A-D, i varje kolumn är respektive ben jordat (första kolumnen: A-jordad), med positiv spänning på benet i respektive rad (första raden: +1 V på A):

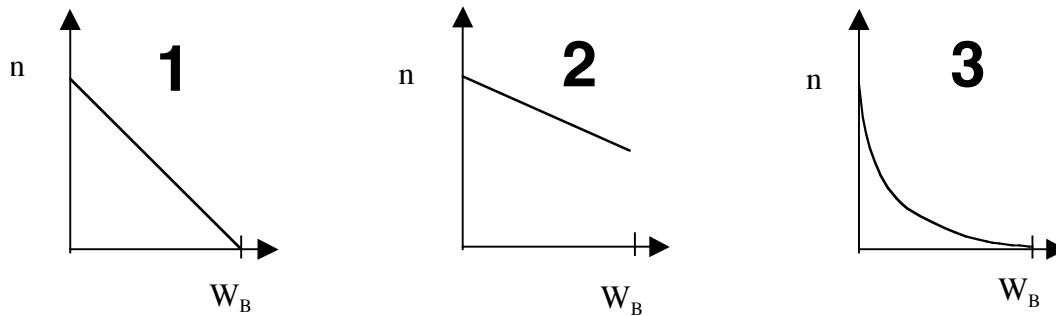
	A (jord)	B (jord)	C (jord)	D (jord)
A (1 V)		$10^{-8}$ A	$10^{-12}$ A	$10^{-8}$ A
B (1 V)	$10^{-2}$ A		$10^{-12}$ A	$10^{-8}$ A
C (1 V)	$10^{-12}$ A	$10^{-12}$ A		$10^{-12}$ A
D (1 V)	$10^{-2}$ A	$10^{-8}$ A	$10^{-12}$ A	

Motivera ditt svar!



### Uppgift 1d

Förklara i vilket av nedanstående fall som elektronflödet från basen till kollektorn är som störst. Figureerna visar elektronkoncentrationen i basen i samma skala för tre npn-transistorer. Emittern är till vänster och kollektorn till höger.



## GRUPP 2

Deluppgiften skall lösas utan andra hjälpmedel än skrivdon. Korrekt svar ger 2 poäng.

### Uppgift 2, Tillverkningsteknik

Vad är det rent tillverkningsmässigt som skiljer en termisk oxid från en deponerad oxid?



## GRUPP 3

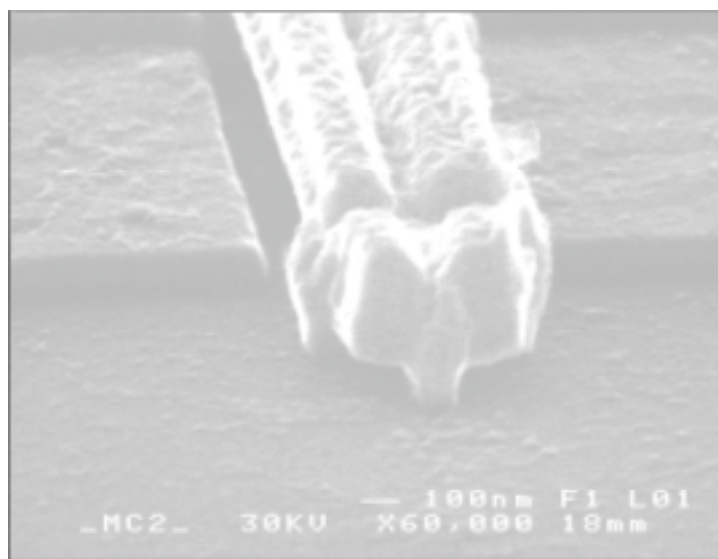
Uppgifterna får lösas med valfria hjälpmedel, vilket innebär att lösningarna till uppgifterna i grupp 1 och 2 måste ha lämnats in innan hjälpmedel får tas fram. Varje uppgift kan ge 5 poäng, där 4 poäng ges till innehållsmässigt godkänd lösning. För att få 5 poäng måste lösningen dessutom vara välmotiverad, välgjord och välstrukturerad.

### Uppgift 3

En pn-övergång har en inbyggd serieresistans på hela  $10 \text{ M}\Omega$  på g a tillverkningsfel. Kontaktpotentialen,  $V_{bi}$ , är  $0,8 \text{ V}$  och mättnadsströmmen,  $I_0$ , är  $1 \text{ pA}$ . Vilket framspänningsfall kommer man att mäta upp för dioden, om man använder en modell där strömmen är noll fram till framspänningsfallet och sedan växer linjärt med spänningen? Vilken pålagd spänning kommer att krävas för att hela kontaktpotentialen skall vara upphävd av pålagd spänning över spärrskiktet?

### Uppgift 4

Mikael Malmkvist på MC2 bygger HEMTar med avancerad "band-gap engineering", d v s flera olika halvledarmaterial med olika bandgap kombinerade. Gatelängden är kort, ungefär  $100 \text{ nm}$ , se mikroskopbilden nedan som visar gatemetallen med svampformat tvärsnitt.

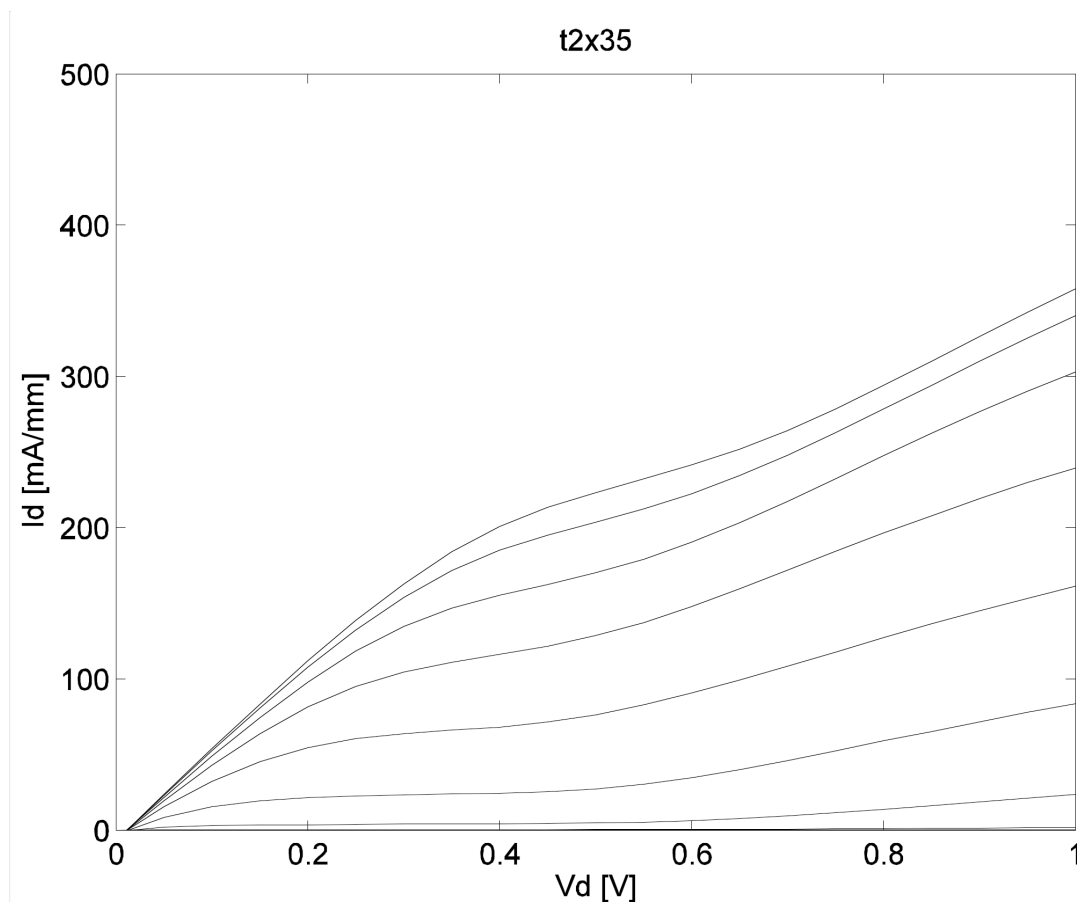


Under gatemetallen ligger flera halvledarlager enligt nästa figur:



Ga <sub>0,47</sub> In <sub>0,53</sub> As n <sup>+</sup> cap	100 Å
Al <sub>0,60</sub> In <sub>0,40</sub> As barrier and spacer	80 Å
Si planar doping	35 Å
Ga <sub>0,35</sub> In <sub>0,65</sub> As channel	150 Å
Al <sub>0,48</sub> In <sub>0,52</sub> As buffer	5000 Å
Semi-insulating InP substrate	450 μm

När Mikael mäter utgångskaraktistik för transistorn får han nedanstående resultat:



Strömmen är angiven per mm transistorbredd. Översta kurvan motsvarar  $V_{GS}=0,4$  V och sedan sjunker  $V_{GS}$  med 0,1 V per kurva. Transistorn är byggd för att ge bättre högfrekvensprestanda än en vanlig MOSFET. Beräkna maximala elektronmobiliteten i Mikael's transistor utgående från mätdata!



# Lösningsförslag

## Tentamen 31 mars 2005

**Fysik, del C**

**Mikroelektronik;**

**Fasta tillståndets elektronik**

**Komponenter, del A**

**för D2 (FFY 171)**

**för E2 (ETI 145)**

Tentamen äger rum i V-salarna torsdag 31/3 2005 mellan klockan 08.30 och 12.30.

Ansvarig lärare är Per Lundgren, tel. 772 18 82.

Inga tillåtna hjälpmedel mer än skrivutensilier på tentatalen i grupp 1-2. När lösningar till grupp 1 och 2 lämnats in får valfria hjälpmedel (utom levande rådgivare) användas för att bearbeta uppgifterna i grupp 3.

För godkänt krävs 8 av 18 poäng, varav examinationsspoäng från kursen (0-5 poäng) kan vara en del. Dessutom måste man erhålla 5 av maximalt 6 möjliga poäng på de fyra deltalerna i grupp 1 (1a-d), där varje tal kan ge 2 poäng. I grupp 2 kan man erhålla maximalt 2 poäng. Uppgifterna i grupp 3 kan ge 5 poäng vardera. 11-14 totalpoäng ger delbetyg 4, och fler än 14 poäng ger delbetyg 5.

Lösningar anslås fredag 1/4 utanför kontor B509 i MC2.

Preliminära rättningsprotokoll anslås vid respektive linjes (E & D) normala anslagsplatser samt utanför kontor B509 i MC2 senast torsdag 14/4 klockan 12.00.

Granskning av tentamen sker på avdelningen för fasta tillståndets elektronik fredag 15/4 klockan 11.00-13.00.

**Chalmers tekniska högskola**

**Fasta tillståndets elektronik**

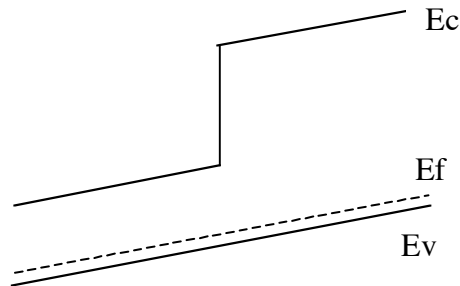
**mars 2005**



## GRUPP 1

Deluppgifterna (1a-d) skall lösas utan andra hjälpmedel än skrivdon. Varje deluppgift kan ge 2 poäng. Maximalt 6 poäng kan erhållas totalt från denna grupp och minst 5 poäng krävs för godkänt.

### Lösningförslag uppgift 1a



### Lösningförslag uppgift 1b

Ideala diodekvationen:  $I=I_0(e^{qV/kT}-1)$ . Alternativ 2 avviker eftersom den andra termen i parentesen saknas, men detta ger skillnad bara för låga spänningar ( $V < 0,1$  V eller så). För alternativ 1 dominerar först den första exponentialtermen upp till ungefär 0,5 V och sedan tar den andra över, d v s det ser inte ut som EN exponentialfunktion (enligt ideala diodekvationen). Alternativ 3 visar en allt mer resistiv karakteristik (linjär) för spänningar över 0,5 V. Slutsatsen är att alternativ 2 passar bäst.

$$1) I=15 \cdot 10^{-9} \cdot e^{19 \cdot V} + 3 \cdot 10^{-13} \cdot e^{41 \cdot V}; \quad 2) I=7 \cdot 10^{-6} \cdot e^{40 \cdot V}; \quad 3) V=5 \cdot I + 0,02 \cdot \ln[I/10^{-12}];$$

### Lösningförslag uppgift 1c

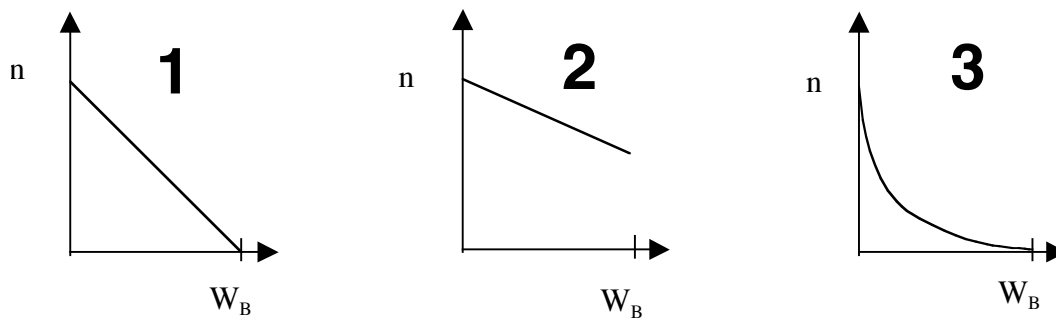
Styret skall vara isolerat från övriga anslutningar, och högst resistans mot alla andra ben ges för ben C, så detta är styret. Source och drain bör vara symmetriska och går därmed inte att särskilja, men det skall inte heller spela någon roll om vi lägger spänning åt ena eller andra hållet mellan source och drain, och detta uppfyller B & D. Återstår A, och för A ser vi diodkarakteristik gentemot B & D, där det ser framspänt ut med positiv spänning på source eller drain – alltså p-dopad source och drain och därmed p-kanaltransistor

	A (jord)	B (jord)	C (jord)	D (jord)
A (1 V)		$10^{-8}$ A	$10^{-12}$ A	$10^{-8}$ A
B (1 V)	$10^{-2}$ A		$10^{-12}$ A	$10^{-8}$ A
C( 1 V)	$10^{-12}$ A	$10^{-12}$ A		$10^{-12}$ A
D (1 V)	$10^{-2}$ A	$10^{-8}$ A	$10^{-12}$ A	



### Lösningförslag uppgift 1d

Brant lutning=hög diffusionsström. I figur 1 är lutningen brantast vid kollektorändan för de tre fallen, så där är också elektronflödet in i kollektorn högst. I 2 har vi lägre gradient i hela basen, och i 3 finns det rekombination i basen eftersom flödet avtar ju närmare kollektorn vi kommer.



### GRUPP 2

Deluppgifterna skall lösas utan andra hjälpmedel än skrivdon. Korrekt svar ger 2 poäng.

### Lösningförslag uppgift 2, Tillverkningsteknik

En termisk oxid odlas genom att syre reagerar med kiselsubstratet (oxiderar substratet), medan en deponerad oxid bildas i gasfas och sedan lägger sig på substratet (utan att reagera med detta).





## GRUPP 3

Uppgifterna får lösas med valfria hjälpmedel, vilket innebär att lösningarna till uppgifterna i grupp 1 och 2 måste ha lämnats in innan hjälpmedel får tas fram. Varje uppgift kan ge 5 poäng, där 4 poäng ges till innehållsmässigt godkänd lösning. För att få 5 poäng måste lösningen dessutom vara välmotiverad, välgjord och välstrukturerad.

### Lösningsförslag uppgift 3

$V=10^6 \cdot I + 0,026 \cdot \ln[10^{12} \cdot I]$ . Den andra termen är spänningen över spärrskiktet och den första spänningen över serieresistansen. Karakteristiken kommer att börja se linjär ut när en spänningsökning fördelar sig lika mellan serieresistans och spärrskikt, d v s när:

$$10^6 \cdot I = 0,026 \rightarrow I \approx 30 \text{ nA} \rightarrow \text{framspänningsfallet} \approx 0,3 \text{ V.}$$

För att den andra termen skall vara 0,8 V krävs en ström på ungefär 30 A, vilket ger ett totalt spänningsfall på 30 MV ungefär. Nätt liten spänning...

### Uppgift 4

Om man betraktar komponenten som en MOSFET där oxiden istället motsvaras av "cap, barrier och spacing", så kan man beräkna mobilitet utgående från t ex maximal transkonduktans i mättnad. Den maximala transkonduktansen blir ungefär 1 kS/mm (per millimeter kanalbredd). Vi har för transkonduktans i mättnad:

$$g_m = (b/l) \cdot (\epsilon/t) \cdot \mu \cdot (V_{GS} - V_T).$$

Med dielektricitetskonstant på ungefär 10 för halvledarna och givna mått på kanallängd och tjocklekar och  $V_{GS} - V_T \approx 0,5 \text{ V}$  får vi:

$$10^6 = 10^7 \cdot (10^{-10}/2 \cdot 10^{-8}) \cdot \mu \cdot 0,5 \rightarrow \mu \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{Vs}$$



# Rättningsmall

## Tentamen 31 mars 2005

**Fysik, del C**

**Fasta tillståndets elektronik**

**för D2 (FFY 171)**

**Mikroelektronik;**

**Komponenter, del A**

**för E2 (ETI 145)**



## GRUPP 1

### Uppgift 1a

Lika avstånd mellan $E_v$ och $E_f$ i båda materialen (och p-typ)	+1 p
Elektronaffinitet korrekt behandlad	+1 p
Pålagd spänning åt fel håll/ingen spänning pålagd	-1 p

### Uppgift 1b

Argumenterar utgående från korrekt ideal diodekvation	+1 p
Diod 2 mest ideal med angivet (rimligt) argument	+1 p

### Uppgift 1c

Korrekt identifiering av benen med motivering	+1 p
Identifiering av p-kanal med motivering	+1 p
Korrekt svar utan motivering	1 p

### Uppgift 1d

Alternativ 1 eftersom brantast derivata	2 p
Alternativ 1 med svag motivering	1 p
Alternativ 2 eftersom det där "finns elektroner vid kollektorn"	1 p

## GRUPP 2

Termisk oxid genom reaktion mellan syre och substratkisel	+1 p
Deponering lägger oxid på substratet utan substratreaktion	+1 p



## GRUPP 3

### Uppgift 3

OK beräkning av framspänningsfall	+2 p
OK beräkning av pålagd spänning då $V_{bi}$ motverkad	+2 p

### Uppgift 4

Numeriskt värde för mobilitet uträknad med antaganden	+4 p
Varje orimligt antagande	-1 p
Avsaknad av enhet	-1 p
Beräkningsfel	-1 p