

# Halvlederkomponenter

## Innledning og bakgrunn for kurset

Forskningen og utviklingen innen halvlederfysikk etter 2. verdenskrig har dannet grunnlaget for dagens moderne samfunn. Raske og energieffektive elektriske komponenter produseres for stadig flere anvendelser, samtidig som utviklingen med å miniaturisere komponentene har *nesten* vært eksponentiell og noen komponentdimensjoner er nå kun 3-5 nanometer. Det har ført til at den ordinære silisiumteknologien snart har nådd sin fysiske grense og den berømte Moore's lov er ikke lenger gyldig. Samtidig har nye materialer og komponenter utviklet seg til å bli svært sentrale/avgjørende for produksjon av miljøvennlig energi via sol- og brenselceller og for nye effektive faststoff-lyskilder (Nobelprisen i Fysikk, 2014). En annen spennende anvendelse av halvledermaterialer er innen detektorer, for eksempel deteksjon av høyenergetiske elementærpartikler (f.eks. Higgs boson, Nobelprisen i 2013): I tillegg er et voksende forskningsfelt nå om dagen bruk av punktdefekter i halvledere i kvanteteknologi.

I dette kurset ser vi på virkemåten til «enkle» halvlederkomponenter som dioder, solceller og transistorer og de tilsvarende fysikalske prosessene. Innledningen av kurset legger vekt på halvledermaterialer og grunnleggende elektriske og optiske fenomener. Deretter fortsetter vi med ulike komponenter som dioden, felteffekttransistorer, den bipolare transistoren samt opto-elektriske komponenter som solceller, lysdioder, foto- og partikkeldetektorer. Kurset omfatter i tillegg labøvelser hvor studentene lager sine egne komponenter i renrommet ved UiO's Mikro- og Nanoteknologi laboratorium (UiO/MiNaLab).

## Omfang

Kurset er på 10 studiepoeng med 35t forelesninger, 24t regneøvelser/kollokvier samt 20t lab.

Foreleser og kursansvarlig: Lasse Vines (lasse.vines@fys.uio.no)

Labansvarlig: Viktor Bobal (viktor.bobal@fys.uio.no)

## Anbefalte forkunnskaper

FYS1120 - Elektromagnetisme, FYS1210 - Elektronikk med prosjektoppgaver, FYS2140 - Kvantefysikk og FYS2160 - Termodynamikk og statistisk fysikk.

## Kurslitteratur

Solid State Electronic Devices (7th edition), Ben G. Streetman and Sanjay Banerjee, Prentice-Hall, ISBN-13: 978-0-13-335603-8 el. ISBN-13: 9781292060552

For leseinstruksjoner, se sider 3 til 5 i dette notatet.

## Eksaminasjon

Skriftlig underveiseksamen 14. oktober kl 1500 (3t) i Sal 3C i Silurveien 2, (ca 20 % vekt), individuell lab-rapport (ca 20 %) med leveringsfrist Søndag 28. november, og avsluttende muntlig eksamen i uke 49 eller 50 (ca 60 %). Bokstavkarakter.

Kurset defineres av kurslitteraturen ("Streetmans bok" og oppgaver) samt gjennomgått stoff ved forelesninger, øvelser/kollokvier og lab.

# FYS3280/4280 HALVLEDERKOMPONENTER, H21

## Oversiktlig Forelesningsplan

**Rom: Kristian Birkelands aud.,**

**Mandager kl. 1015 - 1200**

**Torsdager kl. 1215 - 1400 (frem til uke 38)**

Merk: Det er satt opp flere forelesninger i timeplanen enn planlagt. Vi kommer til å benytte torsdagsforelesningene i begynnelsen for å komme godt i gang, deretter går vi over til å ha kun 2t forelesning i uken fra midten av september.

Dato	Timer	Kap.	Avsnitt
23/8	2	1,3	Kurspresentasjon, egenskaper til halvledermaterialer
26/8	2	3	Egenskaper til halvledermaterialer
30/8	2	3	Egenskaper til halvledermaterialer
2/9	2	3,4	Ladningsbærere i halvledere; levetid, drift og diffusjon
6/9	2	4	L-bærere i halvledere; levetid, drift, diffusjon
9/9	2	4,5	L-bærere i halvledere; levetid, drift, diffusjon, pn-overgang
13/9	2	5	Pn-overgang
16/9	2	5	Pn-overgang
20/9	2	5	Pn-overgang, Schottkydiode
27/9	2	6	Felteffekttransistor; JFET og MESFET
4/10	2	6	Felteffekttransistor; MOSFET
18/10	2	6	Felteffekttransistor; MOSFET
25/10	2	6,7	Bipolartransistor
1/11	2	7,8	Bipolartransistor, optoelektroniske komponenter
8/11	2	8	Optoelektroniske komponenter (Solceller)
15/11	2	8	Optoelektroniske komponenter (LED, detektorer, Lasere)
22/11	2	3,4,5,6,7,8	Repetisjon

## Oversiktlig plan for regneøvelser og kollokvier

**Rom: Seminarrom V203,**

**Tirsdager kl. 1415 - 1600**

Dato	Timer	Kap.	Avsnitt
31/8	2	3	Egenskaper til halvledermaterialer
7/9	2	3,4	Egenskaper til halvledere, ladningsbærere; levetid
14/9	2	5	Pn-overgangen
21/9	2	5	Pn-overgangen, Schottkydiode
28/9	2	3-5	JFET og MESFET
5/10	2	3-5	Forberedelse til midtveiseksamen; oppg. fra kap. 3-5
19/10	2	6	JFET, MESFET og MOSFET
26/10	2	6	MOSFET og Bipolartransistor
2/11	2	6,7	Bipolartransistor
9/11	2	7	Optokomponenter
16/11	2	8	Optokomponenter, laboppgaver
23/11	2	8	laboppgaver

## Labøvelser

Utføres i Mikro- og Nanoteknologilaboratoriet (MiNaLab), Gaustadalleen 23C, og starter i uke 42 (18-22/10). Totalt 5 labøvelser (1 lab per uke) med 4 timer varighet. Lab-dager avtales før midtveiseksamen. Frist for levering av lab-rapport: 28.11.2019. Labøvelsene er obligatoriske og hver student skriver egen rapport. Digital innlevering.

## FYS2210 - LESINSTRUKSER TIL "STREETMAN"

**A: Meget viktig, tekstmasse og beregninger skal være godt kjent**

**B: Viktig, skal leses og kan inngå ved eksaminasjon**

**C: Leses kursivt eller forutsettes kjent fra andre kurs**

<b>1</b>	CRYSTAL PROPERTIES AND GROWTH OF SEMICONDUCTORS	1	
1.1	Semiconductor Materials	1	B
1.2	Crystal Lattices	3	B
1.2.1	Periodic Structures	3	B
1.2.2	Cubic Lattices	5	B
1.2.3	Planes and Directions	7	B
1.2.4	The Diamond Lattice	9	B
1.3	Bulk Crystal Growth	12	B
1.4	Epitaxial Growth	17	B
<b>2</b>	ATOMS AND ELECTRONS	32	C
<b>3</b>	ENERGY BANDS AND CHARGE CARRIERS IN SEMICONDUCTORS	63	
3.1	Bonding Forces and Energy Bands in Solids	63	B
3.1.1	Bonding Forces in Solids	64	B
3.1.2	Energy Bands	66	B
3.1.3	Metals, Semiconductors, and Insulators	69	A
3.1.4	Direct and Indirect Semiconductors	70	B
3.1.5	Variation of Energy Bands with Alloy Composition...	72	B
3.2	Charge Carriers in Semiconductors	74	A
3.2.1	Electrons and Holes	74	A
3.2.2	Effective Mass	79	A
3.2.3	Intrinsic Material	83	A
3.2.4	Extrinsic Material	84	A
3.2.5	Electrons and Holes in Quantum Wells	87	A
3.3	Carrier Concentrations	89	A
3.3.1	The Fermi Level	89	A
3.3.2	Electron and Hole Concentration at Equilibrium	92	A
3.3.3	Temperature Dependence of Carrier Concentrations	97	A
3.3.4	Compensation and Space Charge Neutrality	99	A
3.4	Drift of Carriers in Electric and Magnetic Fields	100	A
3.4.1	Conductivity and Mobility	100	A
3.4.2	Drift and Resistance	105	A
3.4.3	Effects of Temperature and Doping on Mobility	106	A
3.4.4	High Field Effects	109	A
3.4.5	The Hall Effect	109	A
3.5	Invariance of the Fermi Level at Equilibrium	111	A
<b>4</b>	EXCESS CARRIERS IN SEMICONDUCTORS	122	
4.1	Optical Absorption	122	A
4.2	Luminescence	125	A
4.2.1	Photoluminescence	126	A
4.2.2	Electroluminescence	128	A
4.3	Carrier Lifetime and Photoconductivity	128	A

	4.3.1	Direct Recombination of Electrons and Holes	129	A
	4.3.2	Indirect Recombination; Trapping	131	A
	4.3.3	Steady State Carrier Generation; Quasi-Fermi Levels	134	B
	4.3.4	Photoconductive Devices	136	B
4.4		Diffusion of Carriers	137	A
	4.4.1	Diffusion Processes	138	A
	4.4.2	Diffusion and Drift of Carriers; Built-in Fields	140	A
	4.4.3	Diffusion and Recombination; Continuity Equation	143	A
	4.4.4	Steady State Carrier Injection; Diffusion Length	145	A
	4.4.5	The Haynes-Shockley Experiment	147	B
	4.4.6	Gradients in the Quasi-Fermi Levels	150	B

## 5 JUNCTIONS 159

5.1		Fabrication of p-n Junctions	159	A
	5.1.1	Thermal Oxidation	160	A
	5.1.2	Diffusion	161	A
	5.1.3	Rapid Thermal Processing	163	A
	5.1.4	Ion Implantation	164	A
	5.1.5	Chemical Vapor Deposition (CVD)	167	A
	5.1.6	Photolithography	168	A
	5.1.7	Etching	171	A
	5.1.8	Metallization	173	A
5.2		Equilibrium Conditions	174	A
	5.2.1	The Contact Potential	175	A
	5.2.2	Equilibrium Fermi Levels	180	A
	5.2.3	Space Charge at a Junction	180	A
5.3		Forward- and Reverse-Biased Junctions; Steady State	185	A
	5.3.1	Qualitative Description of Current Flow at a Junction	185	A
	5.3.2	Carrier Injection	189	A
	5.3.3	Reverse Bias	198	A
5.4		Reverse-Bias Breakdown	200	A
	5.4.1	Zener Breakdown	201	A
	5.4.2	Avalanche Breakdown	202	A
	5.4.3	Rectifiers	205	B
	5.4.4	The Breakdown Diode	208	B
5.5		Transient and A-C Conditions	209	B
	5.5.1	Time Variation of Stored Charge	209	B
	5.5.2	Reverse Recovery Transient	212	B
	5.5.3	Switching Diodes	216	B
	5.5.4	Capacitance of p-n Junctions	216	A
	5.5.5	The Varactor Diode	221	C
5.6		Deviations from the Simple Theory	222	B
	5.6.1	Effects of Contact Potential on Carrier Injection	223	B
	5.6.2	Recombination and Generation in Transition Region	225	A
	5.6.3	Ohmic Losses	227	A
	5.6.4	Graded Junctions	228	C
5.7		Metal-Semiconductor Junctions	231	A
	5.7.1	Schottky Barriers	231	A
	5.7.2	Rectifying Contacts	233	A
	5.7.3	Ohmic Contacts	235	A
	5.7.4	Typical Schottky Barriers	237	A
5.8		Heterojunctions	238	B

## 6 FIELD-EFFECT TRANSISTORS 257

6.1		Transistor Operation	258	B
	6.1.1	The Load Line	259	B
	6.1.2	Amplification and Switching	259	B
6.2		The Junction FET	260	A
	6.2.1	Pinch-off and Saturation	261	A
	6.2.2	Gate Control	263	A
	6.2.3	Current voltage characteristics	265	A
6.3		The Metal-Semiconductor FET	261	A
	6.3.1	The GaAs MESFET	267	A
	6.3.2	The High Electron Mobility Transistor (HEMT)	268	A
	6.3.3	Short Channel Effects	270	B
6.4		The Metal-Insulator-Semiconductor FET	271	A
	6.4.1	Basic Operation and Fabrication	271	A

	6.4.2	The Ideal MOS Capacitor	275	A
	6.4.3	Effects of Real Surfaces	286	A
	6.4.4	Threshold Voltage	289	A
	6.4.5	MOS Capacitance-Voltage Analysis	291	B
	6.4.6	Time-dependent Capacitance Measurements	295	C
	6.4.7	Current-voltage Characteristics of MOS Gate Oxides	296	B
6.5		The MOS Field-Effect Transistor	299	A
	6.5.1	Output Characteristics	299	A
	6.5.2	Transfer Characteristics	302	A
	6.5.3	Mobility Models	305	B
	6.5.4	Short Channel MOSFET I-V Characteristics	307	B
	6.5.5	Control of Threshold Voltage	309	A
	6.5.6	Substrate Bias Effects	312	C
	6.5.7	Subthreshold Characteristics	316	B
	6.5.8	Equivalent Circuit for the MOSFET	318	C
	6.5.9	MOSFET Scaling and Hot Electron Effects	321	C
	6.5.10	Drain-Induced Barrier Lowering	325	C
	6.5.11	Short-Channel and Narrow Width Effect	327	C
	6.5.12	Gate-Induced Drain Leakage	329	C
6.6		Advanced MOSFET structures	330	B
	6.6.1	Metal Gate-High-k	330	B
	6.6.2	Enhanced Channel Mobility Mat's and Strained Si FETs	331	B
	6.6.3	SOI MOSFETs and FinFETs	333	B

## 7

		BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS	348	
	7.1	Fundamentals of BJT Operation	348	A
	7.2	Amplification with BJTs	352	A
	7.3	BJT Fabrication	355	B
	7.4	Minority Carrier Distributions and Terminal Currents	358	A
	7.4.1	Solution of the Diffusion Equation in the Base Region	359	A
	7.4.2	Evaluation of the Terminal Currents	361	A
	7.4.3	Approximations of the Terminal Currents	364	A
	7.4.4	Current Transfer Ratio	366	A
	7.5	Generalized Biasing	367	C
	7.5.1	The Coupled-Diode Model	368	C
	7.5.2	Charge Control Analysis	373	C
	7.6	Switching	375	C
	7.6.1	Cutoff	376	C
	7.6.2	Saturation	377	C
	7.6.3	The Switching Cycle	378	C
	7.6.4	Specifications for Switching Transistors	379	C
	7.7	Other Important Effects	380	A
	7.7.1	Drift in the Base Region	381	A
	7.7.2	Base Narrowing	382	A
	7.7.3	Avalanche Breakdown	383	B
	7.7.4	Injection Level; Thermal Effects	385	C
	7.7.5	Base Resistance and Emitter Crowding	386	C
	7.7.6	Gummel-Poon Model	388	C
	7.7.7	Kirk Effect	391	C
	7.8	Frequency Limitations of Transistors	394	C
	7.8.1	Capacitance and Charging Times	394	C
	7.8.2	Transit Time Effects	397	C
	7.8.3	Webster Effect	398	C
	7.8.3	High-Frequency Transistors	398	C
	7.9	Heterojunction Bipolar Transistors	400	B

## 8

		Optoelectronic Devices	410	
	8.1	Photodiodes	410	A
	8.1.1	Current and Voltage in an Illuminated Junction	411	A
	8.1.2	Solar Cells	414	A
	8.1.3	Photodetectors	417	A
	8.1.4	Gain, Bandwidth, and S-N ratio of Photodetectors	419	C
	8.2	Light-Emitting Diodes	422	A
	8.2.1	Light Emitting Materials	423	A
	8.2.2	Fiber Optic Communications	427	C

8.3	Lasers	430	
8.4	Semiconductor Lasers	434	
	8.4.1	Population Inversion at a Junction	435
	8.4.2	Emission Spectra for p-n Junction Lasers	437
	8.4.3	The Basic Semiconductor Laser	438
	8.4.4	Heterojunction Lasers	439
	8.4.5	Materials for Semiconductor Lasers	442
	8.4.6	Quantum Cascade Lasers	444

A  
A  
A  
A  
A  
B  
A  
C

**9-11**     *UTGÅR!*