

---

# UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

First Semester Examination  
Academic Session 2005/2006  
*Peperiksaan Semester Pertama  
Sidang Akademik 2005/2006*

November 2005

## **EBB 424E/3 - Semiconductor Devices and Optoelektronik** ***EBB 424E/3 - Peranti Semikonduktor dan Optoelektronik***

Time : 3 hours  
*Masa : 3 jam*

---

Please check that this examination paper consists of SIXTEEN pages of printed material and ONE pages APPENDIX before you begin the examination.

This paper contains SEVEN questions. FOUR questions in SECTION A and THREE questions in SECTION B.

Answer FIVE questions. Answer TWO question from SECTION A, TWO question from SECTION B and ONE question from any sections. If a candidate answer more than five questions, only the first five answered will be examined and awarded marks.

Answer to any question must start on a new page.

All questions must be answered in English. However, TWO questions can be answered in Bahasa Malaysia.

*Sila pastikan bahawa kertas peperiksaan ini mengandungi ENAM BELAS muka surat beserta SATU muka surat (Lampiran) yang bercetak sebelum anda memulakan peperiksaan.*

*Kertas soalan ini mengandungi TUJUH soalan. EMPAT soalan di BAHAGIAN A dan TIGA soalan di BAHAGIAN B.*

*Jawab LIMA soalan. Jawab DUA soalan dari BAHAGIAN A, DUA soalan dari BAHAGIAN B dan SATU soalan dari mana-mana bahagian. Jika calon menjawab lebih daripada lima soalan hanya lima soalan pertama mengikut susunan dalam skrip jawapan akan diberi markah.*

*Mulakan jawapan anda untuk setiap soalan pada muka surat yang baru.*

*Jawab semua soalan dalam Bahasa Inggeris. Walau bagaimanapun, DUA soalan dibenarkan dijawab dalam Bahasa Malaysia.*

...2/-

**PART A****BAHAGIAN A**

1. Consider a NPN BJT that has the following properties. The base is doped  $1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  over a depth  $W_b = 0.9 \text{ }\mu\text{m}$  and corresponding value of diffusion coefficient of  $16.5 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ . The emitter region is doped  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , and the collector region  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . The effective cross-sectional area of device is  $0.02 \text{ mm}^2$ . The electron lifetime in the base is  $150 \text{ ns}$  and intrinsic concentration  $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . Use value of  $k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ,  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ .
- (a) Calculate the CB current transfer ratio  $\alpha$ .  
(20 marks)
- (b) Calculate current gain  $\beta$ .  
(20 marks)
- (c) Suppose that dc bias voltage  $V_{EB}$  is such that emitter dc current is  $2.0 \text{ mA}$ . What is (i)  $V_{EB}$  and (ii) a small-signal input resistance  $r_e$  of transistor in CB configuration?  
(40 marks)
- (d) What is the base current?  
(20 marks)

1. Pertimbangkan suatu transistor simpangan dwikutub jenis NPN dengan sifat-sifat seperti berikut. Kadar pendop pada tapak ialah  $1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  dengan kedalaman  $W_b = 0.9 \text{ } \mu\text{m}$  dan berkaitan dengan nilai pekali resapan  $16.5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . Kawasan pemancar didop dengan ketumpatan  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , manakala kawasan pengumpul  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Luas kawasan berkesan peranti ialah  $0.02 \text{ mm}^2$ . Masa hayat elektron di kawasan tapak ialah  $150 \text{ ns}$  dan ketumpatan cas hakiki  $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . Gunakan nilai-nilai berikut; pemalar Boltzmann,  $k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ , cas elektron,  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , dan suhu bilik,  $T = 300 \text{ K}$ .
- (a) Kira nisbah pemindahan pada litar pemungut dan tapak (CB),  $\alpha$ .  
(20 markah)
- (b) Kira penguatan arus transistor,  $\beta$ .  
(20 markah)
- (c) Apabila voltan arus terus  $V_{EB}$  yang dibekalkan memberikan arus terus pada pemancar  $2.0 \text{ mA}$ . Tentukan (i)  $V_{EB}$  dan (ii) rintangan isyarat masukan  $r_e$  pada susunan CB.  
(40 markah)
- (d) Tentukan nilai arus pada tapak.  
(20 markah)

2. [a] Sketch the basic structures of the (i) n-channel JFET and (ii) p-channel JFET.

(20 marks)

- [b] Sketch and briefly discuss the channel structures for an n-channel JFET when:

- (i) The gate and source shorted ( $V_{GS} = 0$ ).

(10 marks)

- (ii) A positive voltage is applied to drain with respect to source ( $V_{DS} > 0$ ).

(10 marks)

- (iii) Pinch-off condition.

(10 marks)

...5/-

[c] Consider the n-channel JFET common source amplifier as shown in Figure 1. The JFET has an  $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$  and pinch-off voltage  $V_P = 5 \text{ V}$ . Suppose that  $R_D = 2500 \Omega$ :

- (i) Determine Q-point value of the gate biasing circuit. (20 marks)
- (ii) Calculate the voltage across DS circuit,  $V_{DS}$ . (10 marks)
- (iii) Plot the transconductance curve  $I_{DS}$  versus  $V_{GS}$  characteristics of the transistor. (20 marks)

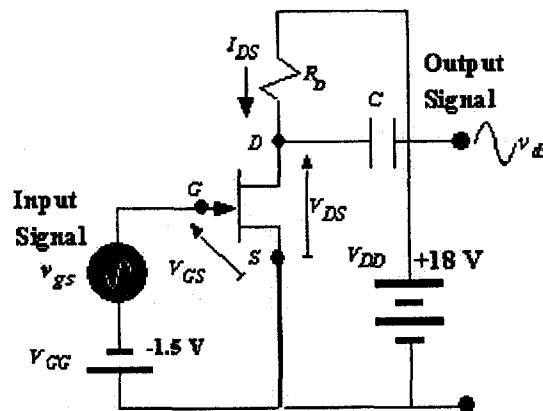


Figure 1

2. [a] Lukis gambarajah struktur asas bagi (i) transistor simpangan kesan medan saluran-n (*n-channel JFET*) dan (ii) transistor simpangan kesan medan saluran-p (*p-channel JFET*).

(20 markah)

- [b] Lukis gambarajah dan bincangkan secara ringkas struktur saluran bagi suatu transistor simpangan kesan medan saluran-n, apabila:

- (i) Pintu (*gate*) dan punca (*source*) dalam keadaan terpinas ( $V_{GS} = 0$ ).

(10 markah)

- (ii) Positif voltan dibekalkan keatas saliran-punca (*drain-source*) atau ( $V_{DS} > 0$ ).

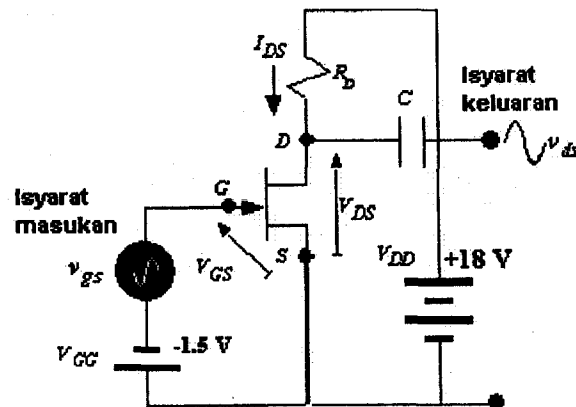
(10 markah)

- (iii) Keadaan jepitan (*pinch-off condition*).

(10 markah)

[c] Pertimbangkan transistor simpangan kesan medan jenis saluran-n dengan penguat punca sepunya (common source amplifier) seperti pada Rajah 1. Transistor ini memberikan nilai  $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$  dan voltan jepitan  $V_P = 5 \text{ V}$ . Apabila rintangan  $R_D = 2500 \Omega$ :

- (i) Tentukan nilai takat-Q (Q-point) daripada pincangan litar pintu. (20 markah)
- (ii) Kira voltan yang merentasi litar DS,  $V_{DS}$ . (10 markah)
- (iii) Plot graf yang menunjukkan ciri-ciri hubungan antara  $I_{DS}$  dengan  $V_{GS}$  bagi transistor itu. (20 markah)



Rajah 1

3. [a] Sketch a typical MOS capacitance versus gate voltage characteristics for NMOS and PMOS.

(20 marks)

- [b] Consider an n-channel MOSFET with doping level  $N_A = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , surface-state charge  $Q_{ox} = 1.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  (positive charge), oxide thickness  $t_{ox} = 0.1 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $\epsilon_{rox} = 3.9$ , modified work function difference between the metal and the semiconductor  $\phi'_{MS} = -0.34 \text{ V}$ , energy difference between Fermi level and the intrinsic level  $\phi_F = 0.32 \text{ V}$ . Calculate the value of

- (i) the gate oxide capacitance per unit area,  $C'_{ox}$

(20 marks)

- (ii) the flat-band voltage,  $V_{FB}$

(20 marks)

- (iii) threshold voltage  $V_{th}$  for surface potential  $V_s = 0$

(40 marks)

3. [a] Lukis contoh graf hubungan kapasitans dengan voltan pintu bagi struktur logam oksida semikonduktor (MOS) jenis-n (NMOS) dan jenis-p (PMOS).

(20 markah)

- [b] Pertimbangkan suatu MOSFET saluran-n dengan ketumpatan pendop  $N_A = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , cas keadaan permukaan  $Q_{ox} = 1.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , ketebalan oksida  $t_{ox} = 0.1 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $\epsilon_{rox} = 3.9$ ,  $\phi'_{MS} = -0.34 \text{ V}$  dan  $\phi_F = 0.32 \text{ V}$ . Kira nilai bagi:

- (i) kapasitans oksida pintu per unit luasan,  $C'_{ox}$

(20 markah)

- (ii) voltan jalur rata,  $V_{FB}$

(20 markah)

- (iii) voltan ambang  $V_{th}$  bagi  $V_s = 0$

(40 markah)

...9/-



4. [a] Find the maximum width of the depletion region for an ideal MOS capacitor on p-type Si with doping level  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , dielectric constant of Si,  $\epsilon_s = 11.8$ , intrinsic level  $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .  
(30 marks)
- [b] By using a typical C-V characteristic curve, the conditions of 4(a) and thickness of  $\text{SiO}_2$  layer is 10 nm, dielectric constant of  $\text{SiO}_2$  is 3.9, calculate:
- (i) the gate oxide capacitance,  $C_{ox}$ .  
(10 marks)
  - (ii) charge per unit area in the depletion region,  $Q_d$ .  
(10 marks)
  - (iii) threshold voltage,  $V_{th}$ .  
(10 marks)
  - (iv) depletion-layer capacitance,  $C_d$  at  $V_{th}$ .  
(20 marks)
  - (v) capacitance minimum,  $C_{min}$ .  
(20 marks)

4. [a] Dapatkan nilai lebar maksimum kawasan penyusutan (depletion region) bagi kapasitor MOS ideal pada Si jenis-p dengan ketumpatan pendop  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , pemalar dielektrik Si,  $\epsilon_s = 11.8$ , ketumpatan intrinsik  $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .

(30 markah)

- [b] Dengan menggunakan lengkok ciri-ciri C-V, mengambilkira keadaan pada soalan 4 (a) dan ketebalan lapisan  $\text{SiO}_2$  ialah 10 nm, pemalar dielektrik  $\text{SiO}_2$  ialah 3.9, kira:

- (i) kapasitans oksida,  $C_{ox}$ .

(10 markah)

- (ii) cas per unit luasan di dalam kawasan penyusutan,  $Q_d$ .

(10 markah)

- (iii) voltan ambang,  $V_{th}$ .

(10 markah)

- (iv) kapasitans lapisan penyusutan,  $C_d$  pada  $V_{th}$ .

(20 markah)

- (v) kapasitans minimum,  $C_{min}$ .

(20 markah)

**PART B****BAHAGIAN B**

5. [a] GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> ternary alloy is a suitable material that can be used to give out visible light for application as light emitting diode (LED). The material is indirect at  $x > 0.45$  but radiative transmission can still be achieved by nitrogen doping.

(i) Explain with appropriate graphs, why the additional of nitrogen leads to such dramatic changes in the quantum efficiencies of the device.

(30 marks)

(ii) Explain in term of quantum mechanics why nitrogen doping is desirable for the GaAsP system.

(20 marks)

[b] Describe the principle of the laser diode by answering the following questions:

(i) What is laser diode? What are the materials selection criteria for a laser diode?

(10 marks)

(ii) What is population inversion and explain the conditions to allow population inversion to occur.

(10 marks)

(iii) Provide a neat sketch of a stripe-geometry double heterojunction laser diode to show a Fabry-Perot configuration.

(30 marks)

...12/-

5. [a] Aloiti ternari  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  adalah bahan yang sesuai untuk menghasilkan cahaya nampak untuk aplikasi sebagai LED. Bahan ini mempunyai jurang tenaga tidak langsung pada  $x > 0.45$  tetapi pemancaran sinaran boleh berlaku dengan pendopan dengan nitrogen.
- (i) Terangkan dengan lakaran graf-graf yang sesuai kenapa penambahan nitrogen membawa kepada perubahan dramatik kecekapan kuantum peranti.  
(30 markah)
- (ii) Terangkan dari segi kuantum mekanik kenapa nitrogen adalah perlu untuk sistem GaAsP.  
(20 markah)
- [b] Terangkan prinsip asas laser diod dengan menjawab soalan-soalan yang berikut:
- (i) Apakah diod laser? Apakah kriteria pemilihan bahan untuk diod laser?  
(10 markah)
- (ii) Apakah populasi songsang dan terangkan keadaan yang membenarkan populasi songsang untuk berlaku.  
(10 markah)
- (iii) Berikan satu lakaran kemas geometri-berjalur dwi-heterosimpang diod laser untuk menunjukkan konfigurasi Fabry-Perot.  
(30 markah)

6. [a] The ternary alloy  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  grown on an InP substrate is a semiconductor material that give out infrared light that is suitable for emitter. The band gap of the alloy on a InP substrate in eV is given by an empirical relationship:

$$E_g \sim 1.35 - 0.72y + 0.12y^2 \text{ for } 0 < x < 0.47$$
$$(y = 2.2x)$$

- (i) Calculate the corresponding band gap for InGaAsP alloy if an emitter that give wavelength of  $1.55 \mu\text{m}$  is to be designed.

(20 marks)

- (ii) Calculate the composition of InGaAsP alloy to give out wavelength of  $1.55 \mu\text{m}$ .

(20 marks)

- [b] Explain briefly why InP is a good substrate for InGaAsP. Explain your answer in terms of the concept of the band gap engineering by sketching band gap versus lattice constant graph of several binary Group III-V materials that are suitable for optoelectronics devices.

(30 marks)

- [c] There are several techniques that can be used to deposit thin film  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  on InP substrate. State 3 examples of these processes and very briefly describe the procedures.

(30 marks)

6. [a] *Aloi terneri  $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$  yang ditumbuhkan di atas substrat InP adalah bahan semikonduktor yang akan menghasilkan cahaya infrared yang sesuai untuk digunakan sebagai pemancar. Jurang tenaga untuk aloi ini pada substrat InP di dalam eV boleh diberi dengan menggunakan persamaan empirikal:*

$$E_g \sim 1.35 - 0.72y + 0.12y^2 \text{ for } 0 < x < 0.47$$

$$(y = 2.2x)$$

- (i) *Kirakan apakah jurang tenaga untuk aloi InGaAsP jika pemancar yang direkabentuk akan menghasilkan panjang gelombang 1.55  $\mu\text{m}$ .*  
(20 markah)
- (ii) *Kirakan komposisi InGaAsP yang boleh memberikan panjang gelombang 1.55  $\mu\text{m}$ .*  
(20 markah)
- [b] *Terangkan dengan ringkas kenapa InP adalah substrat yang baik untuk InGaAsP. Terangkan jawapan anda dengan menggunakan konsep kejuruteraan jurang tenaga dengan melakarkan graf jurang tenaga berlawanan pemalar kekisi beberapa contoh bahan binari kumpulan III-V yang sesuai untuk peranti optoelektronik.*  
(30 markah)
- [c] *Terdapat beberapa kaedah yang boleh digunakan untuk mengendapkan filem nipis  $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$  di atas substrat InP. Tulis 3 contoh untuk proses-proses tersebut dan dengan secara ringkas berikan penerangan proses-proses yang dinyatakan.*  
(30 markah)

7. [a] Describe the principle operation of a pin photodiode and describe the materials selection criteria for high quantum efficiency photodiode.  
(30 marks)
- [b] A p-n junction photodiode can be operated under photovoltaic conditions similar to that of a solar cell. However there exist several differences between photodiode and a solar cell. Discuss the differences between photodiode and a solar cell.  
(30 marks)
- [c] Calculate the responsivity and quantum efficiency of a pin photodiode if the photodiode is made out of silicon with an active light receiving area of 0.2 mm and the wavelength of the radiation that falls on the photodiode is the visible red light with intensity of  $0.1\text{mWcm}^{-1}$  and generates a photocurrent of  $65 \times 10^{-9}\text{A}$ .  
(40 marks)

7. [a] *Terangkan prinsip operasi fotodiod pin dan terangkan apakah kriteria pemilihan bahan untuk menghasilkan fotodiod yang mempunyai kecekapan kuantum yang tinggi.*
- (30 markah)*
- [b] *Satu simpang p-n fotodiod boleh beroperasi di bawah keadaan fotovoltik sama dengan cell suria. Tetapi terdapat beberapa perbezaan di antara fotodiod dan sel suria. Bincangkan perbezaan diantarat fotodiod dan sel suria.*
- (30 markah)*
- [c] *Kira kebersambutan dan kecekapan kuantum fotodiod pin jika fotodiod ini dibuat dari silikon dengan kawasan aktif menerima cahaya sebanyak 0.2 mm dan panjang gelombang untuk radiasi yang terkena fotodiod adalah cahaya nampak merah dengan keamatan  $0.1 \text{ mWcm}^{-1}$  dan menghasilkan fotoarus sebanyak  $65 \times 10^{-9} \text{ A}$ .*
- (40 markah)*



**APPENDIX****LAMPIRAN**

$$D = \left( \frac{kT}{e} \right) \mu$$

$$\tau_i = \frac{W_b^2}{2D}$$

$$I_E = I_{E0} \exp\left( \frac{eV_{EB}}{kT} \right)$$

$$I_{E0} = \frac{eADp_{n0}}{W_b} = \frac{eADn_i^2}{N_d W_b}$$

$$V_{EB} = \left( \frac{kT}{e} \right) \ln\left( \frac{I_E}{I_{E0}} \right)$$

$$V_{DS(sat)} = V_P + V_{GS}$$

$$I_D \approx I_{DS} \approx \frac{V_{DS(sat)}}{R_{AP}(V_{GS})} = \frac{V_P + V_{GS}}{R_{AP}(V_{GS})}$$

$$I_{DS} = I_{DSS} \left[ 1 - \left( \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right) \right]^2$$

$$g_m = \frac{2(I_{DSS} I_{DS})^2}{V_{GS(off)}}$$

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$$

$$W_m = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s \phi_F}{qN_a}}$$

$$V_T = -\frac{Q_d}{C_{ox}} + 2\phi_F$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d}$$

$$C_d = \frac{\epsilon_s}{W_m}$$

$$C_{min} = \frac{C_{ox} C_d}{C_{ox} + C_d}$$

$$E_g = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E_g + \frac{k_B T}{e} = \frac{hc}{e\lambda}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J S}$$

$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$