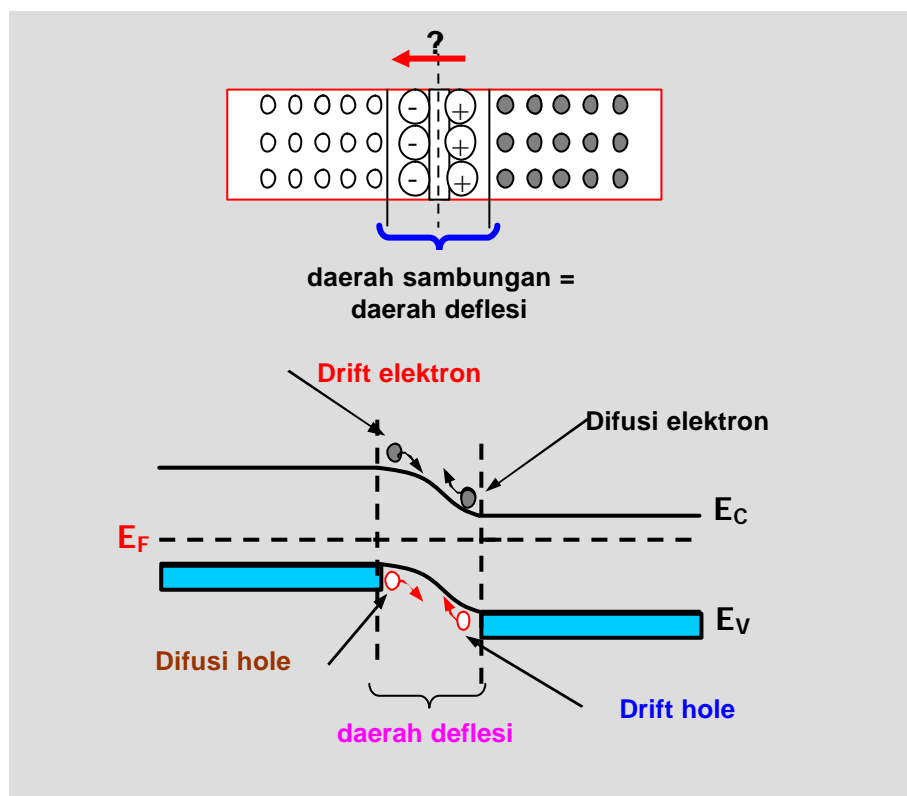


Semikonduktor



BAGIAN PROYEK PENGEMBANGAN KURIKULUM
DIREKTORAT PENDIDIKAN MENENGAH KEJURUAN
DIREKTORAT JENDERAL PENDIDIKAN DASAR DAN MENENGAH
DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

2004

Kode FIS.25

Semikonduktor

Penyusun

Drs. Munasir, MS.

Editor:

Dr. Budi Jatmiko, M.Pd.

Drs. Supardiono, M.Si.

**BAGIAN PROYEK PENGEMBANGAN KURIKULUM
DIREKTORAT PENDIDIKAN MENENGAH KEJURUAN
DIREKTORAT JENDERAL PENDIDIKAN DASAR DAN MENENGAH
DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL**

2004

Kata Pengantar

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas karunia dan hidayah-Nya, kami dapat menyusun bahan ajar modul manual untuk SMK Bidang Adaptif, yakni mata-pelajaran Fisika, Kimia dan Matematika. Modul yang disusun ini menggunakan pendekatan pembelajaran berdasarkan kompetensi, sebagai konsekuensi logis dari Kurikulum SMK Edisi 2004 yang menggunakan pendekatan kompetensi (*CBT: Competency Based Training*).

Sumber dan bahan ajar pokok Kurikulum SMK Edisi 2004 adalah modul, baik modul manual maupun interaktif dengan mengacu pada Standar Kompetensi Nasional (SKN) atau standarisasi pada dunia kerja dan industri. Dengan modul ini, diharapkan digunakan sebagai sumber belajar pokok oleh peserta diklat untuk mencapai kompetensi kerja standar yang diharapkan dunia kerja dan industri.

Modul ini disusun melalui beberapa tahapan proses, yakni mulai dari penyiapan materi modul, penyusunan naskah secara tertulis, kemudian disetting dengan bantuan alat-alat komputer, serta divalidasi dan diujicobakan empirik secara terbatas. Validasi dilakukan dengan teknik telaah ahli (*expert-judgment*), sementara ujicoba empirik dilakukan pada beberapa peserta diklat SMK. Harapannya, modul yang telah disusun ini merupakan bahan dan sumber belajar yang berbobot untuk membekali peserta diklat kompetensi kerja yang diharapkan. Namun demikian, karena dinamika perubahan sains dan teknologi di industri begitu cepat terjadi, maka modul ini masih akan selalu dimintakan masukan untuk bahan perbaikan atau direvisi agar supaya selalu relevan dengan kondisi lapangan.

Pekerjaan berat ini dapat terselesaikan, tentu dengan banyaknya dukungan dan bantuan dari berbagai pihak yang perlu diberikan penghargaan dan ucapan terima kasih. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini tidak

berlebihan bilamana disampaikan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak, terutama tim penyusun modul (penulis, editor, tenaga komputerisasi modul, tenaga ahli desain grafis) atas dedikasi, pengorbanan waktu, tenaga, dan pikiran untuk menyelesaikan penyusunan modul ini.

Kami mengharapkan saran dan kritik dari para pakar di bidang psikologi, praktisi dunia usaha dan industri, dan pakar akademik sebagai bahan untuk melakukan peningkatan kualitas modul. Diharapkan para pemakai berpegang pada azas keterlaksanaan, kesesuaian dan fleksibilitas, dengan mengacu pada perkembangan IPTEK pada dunia usaha dan industri dan potensi SMK dan dukungan dunia usaha industri dalam rangka membekali kompetensi yang terstandar pada peserta diklat.

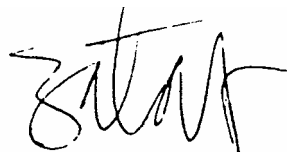
Demikian, semoga modul ini dapat bermanfaat bagi kita semua, khususnya peserta diklat SMK Bidang Adaptif untuk mata-pelajaran Matematika, Fisika, Kimia, atau praktisi yang sedang mengembangkan modul pembelajaran untuk SMK.

Jakarta, Desember 2004

a.n. Direktur Jenderal Pendidikan

Dasar dan Menengah

Direktur Pendidikan Menengah Kejuruan,



Dr. Ir. Gatot Hari Priowirjanto, M.Sc.

NIP 130 675 814

Daftar Isi

| | | |
|---|----------------------------|-----|
| ✍ | Halaman Sampul | i |
| ✍ | Halaman Francis | ii |
| ✍ | Kata Pengantar | iii |
| ✍ | Daftar Isi | v |
| ✍ | Peta Kedudukan Modul | vii |
| ✍ | Daftar Judul Modul | ix |
| ✍ | Glosary | x |

I. PENDAHULUAN

| | | |
|----|---------------------------------|---|
| a. | Deskripsi | 1 |
| b. | Prasarat | 1 |
| c. | Petunjuk Penggunaan Modul | 2 |
| d. | Tujuan Akhir | 2 |
| e. | Kompetensi | 4 |
| f. | Cek Kemampuan | 5 |

II. PEMELAJARAN

| | | |
|----|--------------------------------------|---|
| A. | Rencana Belajar Peserta Diklat | 6 |
|----|--------------------------------------|---|

B. Kegiatan Belajar

| | | |
|----|-----------------------------------|----|
| 1. | Kegiatan Belajar | 7 |
| a. | Tujuan Kegiatan Pemelajaran | 7 |
| b. | Uraian Materi | 7 |
| c. | Rangkuman | 35 |
| d. | Tugas | 37 |
| e. | Tes Formatif | 38 |
| f. | Kunci Jawaban | 40 |
| g. | Lembar Kerja | 42 |

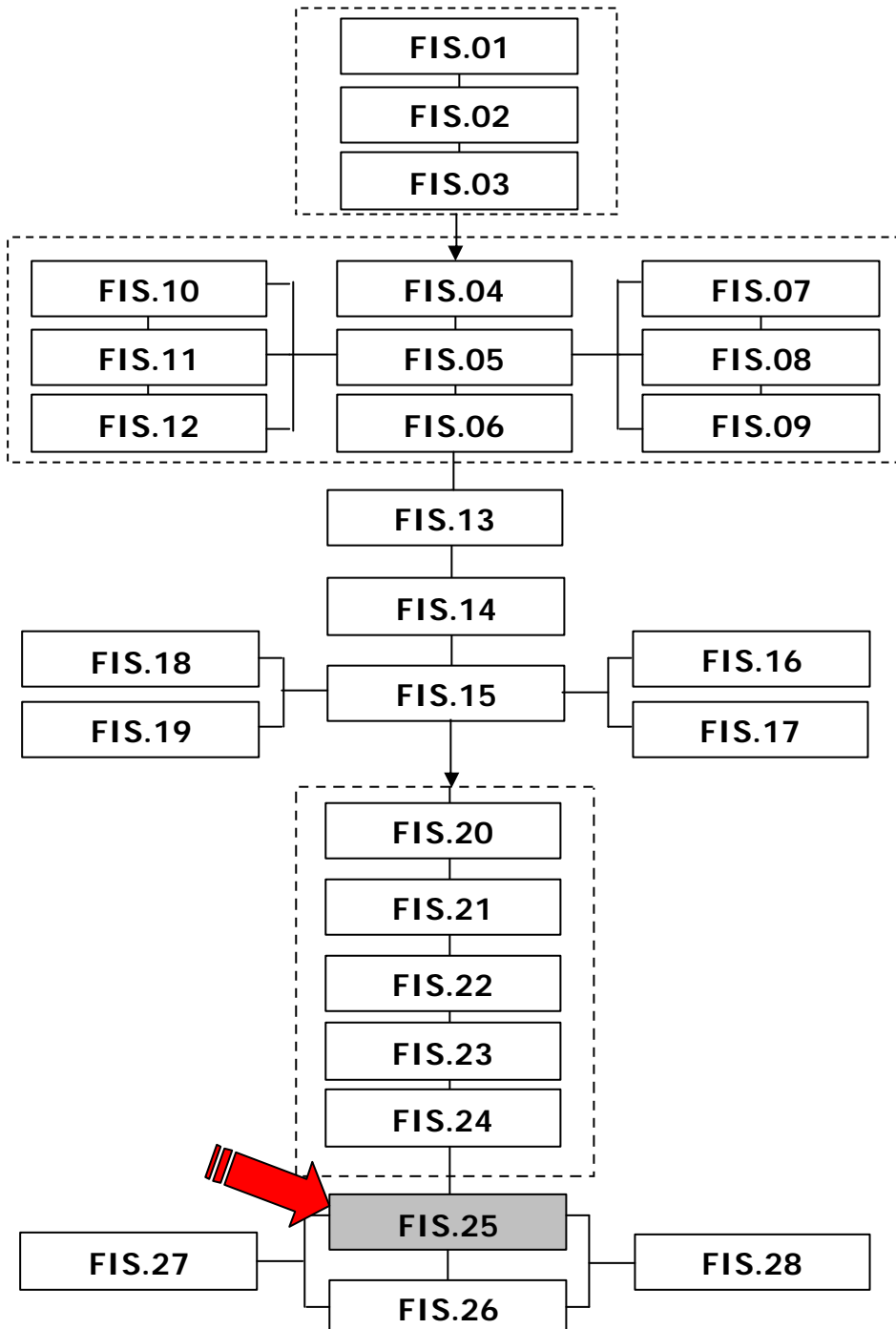
III. EVALUASI

| | | |
|----|--------------------|----|
| A. | Tes Tertulis | 43 |
| B. | Tes Praktik | 44 |

KUNCI JAWABAN

| | |
|---------------------------------------|----|
| A. Tes Tertulis | 45 |
| B. Lembar Penilaian Tes Praktik | 47 |
| IV. PENUTUP | 50 |
| DAFTAR PUSTAKA | 51 |

Peta Kedudukan Modul



DAFTAR JUDUL MODUL

| No. | Kode Modul | Judul Modul |
|-----|------------|--|
| 1 | FIS.01 | Sistem Satuan dan Pengukuran |
| 2 | FIS.02 | Pembacaan Masalah Mekanik |
| 3 | FIS.03 | Pembacaan Besaran Listrik |
| 4 | FIS.04 | Pengukuran Gaya dan Tekanan |
| 5 | FIS.05 | Gerak Lurus |
| 6 | FIS.06 | Gerak Melingkar |
| 7 | FIS.07 | Hukum Newton |
| 8 | FIS.08 | Momentum dan Tumbukan |
| 9 | FIS.09 | Usaha, Energi, dan Daya |
| 10 | FIS.10 | Energi Kinetik dan Energi Potensial |
| 11 | FIS.11 | Sifat Mekanik Zat |
| 12 | FIS.12 | Rotasi dan Kestimbangan Benda Tegar |
| 13 | FIS.13 | Fluida Statis |
| 14 | FIS.14 | Fluida Dinamis |
| 15 | FIS.15 | Getaran dan Gelombang |
| 16 | FIS.16 | Suhu dan Kalor |
| 17 | FIS.17 | Termodinamika |
| 18 | FIS.18 | Lensa dan Cermin |
| 19 | FIS.19 | Optik dan Aplikasinya |
| 20 | FIS.20 | Listrik Statis |
| 21 | FIS.21 | Listrik Dinamis |
| 22 | FIS.22 | Arus Bolak-Balik |
| 23 | FIS.23 | Transformator |
| 24 | FIS.24 | Kemagnetan dan Induksi Elektromagnetik |
| 25 | FIS.25 | Semikonduktor |
| 26 | FIS.26 | Piranti semikonduktor (Dioda dan Transistor) |
| 27 | FIS.27 | Radioaktif dan Sinar Katoda |
| 28 | FIS.28 | Pengertian dan Cara Kerja Bahan |

Glossary

| ISTILAH | KETERANGAN |
|----------------|---|
| Konduktor | Bahan padat yang dapat menghantarkan listrik dengan baik, sebagai contoh adalah bahan logam, pada bahan logam pita konduksinya terisi sebagian oleh elektron sehingga mudah bergerak. Hal inilah yang menyebabkan sifat hantaran listriknya baik. |
| Isolator | Bahan padat yang tidak dapat menghantarkan listrik dengan baik. Karena jika ditinjau dari struktur pita energinya, pita konduksi kosong, pita valensi terisi sebagian dan band gapnya besar, sehingga elektron sulit bergerak bebas, hal inilah yang menyebabkan sifat hantaran listriknya jelek. |
| Semikonduktor | Bahan padat yang sifat hantaran listriknya terletak antara bahan konduktor dan bahan isolator. Pada suhu rendah berperilaku seperti bahan isolator, dan pada suhu tinggi berperilaku seperti bahan konduktor. Pita konduksi dan pita valensi terisi sebagian serta band gapnya cukup sempit. |
| Superkonduktor | Bahan yang dapat menghantarkan listrik sangat baik, karena hambatannya mendekati nol. Sampai saat ini bahan jenis ini baru ditemukan untuk operasi pada temperatur rendah (dibawah 0°C). |
| Pita energi | Berdasarkan azas Pauli, dalam suatu tingkat energi tidak boleh ada lebih dari satu elektron pada keadaan yang sama. Kumpulan garis pada tingkat energi yang sama akan saling berhimpit dan membentuk satu pita: <i>pita energi</i> . |
| Pita valensi | Pita energi teratas yang terisi penuh oleh elektron. |
| Pita konduksi | Pita energi diatas pita valensi yang terisi sebagian atau tidak terisi oleh elektron (kosong) |
| Band gap | Daerah kosong antara pita valensi dan pita konduksi. Atau biasa juga dikenal dengan daerah celah energi = band gap |
| Atom Donor | Atom pengotor yang memiliki 5 elektron valensi, sehingga semikonduktor yang dikotori dengan atom donor ini mengalami kelebihan elektron. Sehingga semikonduktor menjadi tipe-n. Contoh: atom fospor, arsenikum. |

| | |
|--------------------------|---|
| Atom Akseptor | Atom pengotor yang memiliki 3 elektron valensi, sehingga semikonduktor yang dikotori dengan atom akseptor akan kekurangan elektron, sehingga ada hole. Sehingga semikonduktor menjadi tipe-p. Contoh: atom boron, Indium, galium. |
| Semikonduktor intrinsik | Bahan semikonduktor yang masih murni, belum mengalami pengotoran oleh atom donor atau atom akseptor. |
| Semikonduktor ekstrinsik | Bahan semikonduktor yang sudah mengalami pengotoran, oleh atom donor sehingga menjadi tipe-n, dan oleh atom akseptor sehingga menjadi tipe-p. |
| Elektron | Pembawa muatan negatif yang bergerak dari sisi n menuju sisi p pada daerah sambungan semikonduktor p-n. |
| Hole | Pembawa muatan positif yang bergerak dari sisi p menuju sisi n pada daerah sambungan semikonduktor p-n. |
| Amorf | Zat padat yang struktur atomnya memiliki keteraturan dengan jangkauan yang pendek. Contoh: bahan plastik, bahan kaca, dsb. |
| Kristal | Zat padat yang struktur atomnya memiliki jangkauan keteraturan yang panjang. Contoh NaCl, silikon, germanium dsb. Catatan: struktur atom silikon ada dua macam, yaitu amorf dan kristal. |
| Diode semikonduktor | Komponen penyearah arus listrik yang dibuat berdasarkan sambungan p-n semikonduktor. |

BAB I. PENDAHULUAN

A. Deskripsi

Dalam modul ini pelajaran akan dimulai dengan bahasan konsep bahan semikonduktor, semikonduktor intrinsik yang dalam pembahasannya memerlukan beberapa pengetahuan dasar terutama matematika dan mekanika antara lain gerak, gaya, kecepatan, percepatan, energi, dan kelistrikan (arus searah dan arus bolak-balik), dan modul lain yang berkaitan. Agar tidak mengalami kesulitan dalam perhitungan serta pemecahan masalah dalam penerapannya, perlu diawali dengan mengingat kembali beberapa modul lain yang berkaitan.

Pembahasan dilanjutkan dengan fokus pada penjelasan konsep semikonduktor ekstrinsik (tipe-n dan tipe-p), yang berkaitan dengan konsentrasi pembawa muatannya dan penjelasan lain yang berkaitan dengan bentuk sambungan p-n pada bahan semikonduktor dan proses difusi elektron dan hole pada daerah sambungan. Juga dijelaskan diakhir modul tentang beberapa contoh aplikasi sambungan p-n semikonduktor dalam kehidupan sehari-hari. Dan untuk lebih memperdalam pemahaman konsep kepada para peserta diklat, maka dalam modul ini juga dilengkapi dengan soal-soal yang berkaitan dengan penjelasan konsep, soal-soal yang berkaitan dengan perhitungan, dan langkah percobaan sederhana untuk mendukung pemahaman terhadap konsep semikonduktor.

B. Prasyarat

Agar dapat mempelajari modul ini dengan baik, anda harus memahami konsep mekanika seperti gerak, kecepatan, gaya, energi, gelombang, dan kelistrikan (arus searah dan arus bolak-balik). Anda juga harus dapat mengoperasikan persamaan diferensial dan integral untuk

lebih memahami konsep penurunan perumusan matematis dalam penyelesaian persoalan fisisnya. Anda juga harus melakukan percobaan-percobaan sederhana dengan teliti untuk menemukan konsep yang benar.

C. Petunjuk Penggunaan Modul

- a Pelajari daftar isi serta kedudukan modul dengan cermat dan teliti, karena dalam skema modul akan nampak kedudukan modul yang sedang anda pelajari ini diantara modul modul yang lain.
- b Perhatikan langkah-langkah dalam melakukan pemahaman konsep dengan benar serta proses penemuan hubungan antar konsep yang dapat menambah wawasan sehingga mendapatkan hasil yang optimal.
- c Pahami setiap konsep dasar pendukung modul ini misalnya, matematika dan mekanika.
- d Jawablah tes formatif dengan jawaban yang singkat jelas dan tepat dan kerjakan sesuai dengan kemampuan anda setelah mempelajari modul ini.
- e Bila dalam mengerjakan tugas/soal anda menemukan kesulitan, konsultasikan dengan konsultan /instruktur yang ditunjuk.
- f Setiap kesulitan catatlah untuk dibahas dalam saat kegiatan tatap muka. Untuk lebih menambah wawasan diharapkan membaca referensi lain yang berhubungan dengan materi dalam modul ini.

D. Tujuan Akhir

Setelah mempelajari modul ini diharapkan anda dapat:

- ↳ Mendefinisikan pengertian semikonduktor intrinsik dan ekstrinsik.
- ↳ Menjelaskan perbedaan semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik.
- ↳ Menjelaskan perbedaan semikonduktor tipe-n dan tipe-p.

- ↳ Menentukan besar konsentrasi muatan pembawa, elektron (n) dan hole (p) pada semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik.
- ↳ Menjelaskan pengaruh atom pengotor (akseptor dan donor) pada semikonduktor intrinsik.
- ↳ Menjelaskan konsep sambungan pada semikonduktor tipe-n dan tipe-p.
- ↳ Menjelaskan proses difusi elektron dan hole pada daerah sambungan p-n.
- ↳ Menjelaskan konduktivitas pada bahan semikonduktor.
- ↳ Menjelaskan dan menggunakan konsep efek Hall dalam menentukan jenis bahan semikonduktor ekstrinsik, mobilitas listrik Hall, jumlah konsentrasi pembawa muatan (n dan p), juga dalam menentukan lebar energi gap pada bahan semikonduktor.

E. Kompetensi

Kompetensi : MEMAHAMI KONSEP SEMIKONDUKTOR
 Program Keahlian : Program Adaptif
 Mata Diklat-Kode : FISIKA-FIS.25
 Durasi Pembelajaran : 18 jam @ 45 menit

| SUB KOMPETENSI | KRITERIA UNJUK KINERJA | LINGKUP BELAJAR | MATERI POKOK PEMBELAJARAN | | |
|-------------------------------|---------------------------------|--|--|--|---|
| | | | SIKAP | PENGETAHUAN | KETERAMPILAN |
| Memahami konsep semikonduktor | ☞ Memahami konsep semikonduktor | ☞ Bahan semikonduktor intrinsik ☞ Semikonduktor tipe p dan n ☞ Prinsip kerja semikonduktor | ☞ Cermat dalam memahami konsep semikonduktor | ☞ Pengertian semikonduktor ☞ Cara kerja semikonduktor | ☞ Dapat menentukan bahan semikonduktor intrinsik, tipe p atau tipe n. |

F. Cek Kemampuan

Kerjakanlah soal-soal berikut ini, jika anda dapat mengerjakan sebagian atau semua soal berikut ini, maka anda dapat meminta langsung kepada instruktur atau guru untuk mengerjakan soal-soal evaluasi untuk materi yang telah anda kuasai pada BAB III.

1. Definisikan pengertian semikonduktor.
2. Jelaskan apa yang anda ketahui tentang semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik.
3. Jelaskan apa yang anda ketahui tentang semikonduktor tipe-n dan semikonduktor tipe-p, apa prinsip perbedaan diantara keduanya.
4. Jelaskan bagaimana mengenali bahan semikonduktor tipe-n.
5. Jelaskan bagaimana mengenali bahan semikonduktor tipe-p.
6. Jelaskan apa yang berperan dalam penghantaran arus listrik pada bahan semikonduktor.
7. Jelaskan mengapa pada suhu tinggi semikonduktor bersifat sebagai konduktor dan pada suhu rendah bersifat sebagai isolator.
8. Sebutkan dan jelaskan beberapa contoh penggunaan semikonduktor dalam kehidupan sehari-hari (*minimal 2 contoh*).
9. Apa yang saudara ketahui tentang: pita valensi, pita konduksi, energi gap, atom donor, dan atom akseptor. Jelaskan.
10. Tuliskan persamaan yang menyatakan rapat keadaan efektif untuk pita valensi (N_v) dan pita konduksi (N_c).
11. Tuliskan persamaan yang menyatakan rapat elektron (n) atau rapat hole (p) masing-masing pada pita konduksi dan pita valensi.
12. Tuliskan persamaan yang menyatakan hubungan antara rapat pembawa muatan intrinsik terhadap N_v , N_c dan energi gap E_g .

BAB II. PEMBELAJARAN

A. Rencana Belajar Peserta Diklat

- Kompetensi : Semikonduktor
Sub Kompetensi : 1. Memahami konsep semikonduktor intrinsik
2. Memahami konsep semikonduktor ekstrinsik
3. Memahami konsep sambungan p-n

Tuliskan semua jenis kegiatan yang anda lakukan di dalam tabel kegiatan di bawah ini. Jika ada perubahan dari rencana semula, berilah alasannya kemudian mintalah tanda tangan kepada guru atau instruktur anda.

| Jenis Kegiatan | Tanggal | Waktu | Tempat Belajar | Alasan Perubahan | Tanda Tangan Guru |
|----------------|---------|-------|----------------|------------------|-------------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

B. Kegiatan Pembelajaran

1. Kegiatan Pembelajaran 1

a. Tujuan Kegiatan pembelajaran

Setelah mempelajari kegiatan belajar I, diharapkan anda dapat:

- ☞ Mendefinisikan pengertian semikonduktor
- ☞ Menjelaskan karakteristik semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik.
- ☞ Mengetahui konsep atom donor dan atom akseptor.
- ☞ Mengetahui karakteristik semikonduktor tipe-n dan semikonduktor tipe-p.
- ☞ Mampu menghitung rapat keadaan efektif pada pita konduksi dan pita valensi.
- ☞ Mampu menghitung rapat pembawa muatan (elektron n dan hole p) pada pita konduksi dan pita valensi.
- ☞ Menjelaskan dan mengidentifikasi jenis bahan semikonduktor (tipe-n atau tipe-p).
- ☞ Menjelaskan dan memberi contoh-contoh sederhana penggunaan bahan semikonduktor dalam kehidupan sehari-hari.

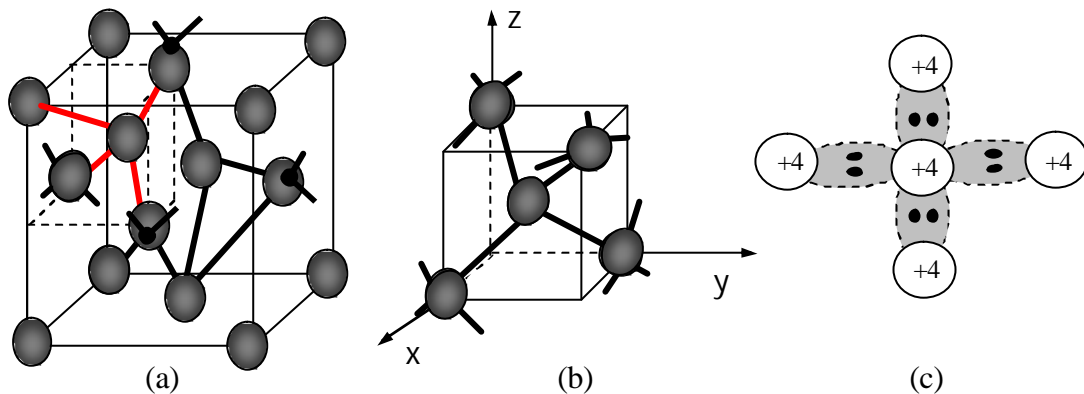
b. Uraian materi

1) Struktur Kristal

Dalam pembahasan semikonduktor, kita tidak lepas dengan pembicaraan utama mengenai bahan padat. Bahan padat pada dasarnya adalah tersusun atas atom-atom, ion-ion, atau molekul-molekul yang letaknya berdekatan dan tersusun teratur membentuk suatu struktur tertentu (*struktur kristal*). Perbedaan sifat pada zat padat (*misal: konduktor, isolator, semikonduktor atau superkonduktor*) disebabkan oleh

perbedaan gaya ikat diantara atom-atom, ion-ion, atau molekul-molekul tersebut. Semua ikatan dalam bahan padat melibatkan gaya listrik, dan perbedaan utama diantara ikatan tersebut tergantung pada jumlah elektron terluar.

Berdasarkan struktur partikel (atom, ion, atau molekul) penyusunnya, bahan padat dibagi menjadi dua jenis yaitu *bahan padat kristal* dan *bahan padat amorf*. *Bahan padat kristal* adalah bahan padat yang struktur partikel penyusunnya memiliki keteraturan panjang dan berulang secara periodik. *Bahan padat amorf* adalah bahan padat yang struktur partikel penyusunnya memiliki keteraturan yang pendek. Khusus untuk bahan semikonduktor ada dua jenis, yakni yang berstruktur kristal (*misal: Silicon, Germanium, Gallium Arsenid, dsb.*) dan berstruktur amorf (*misal: Amorphous silicon*).



Gambar 1. Struktur kristal Si (Silikon)
 (a) Struktur kristal diamond
 (b) Ikatan tetrahedron
 (c) Ikatan tetrahedron 2 dimensi

Bahan semikonduktor silikon adalah bahan semikonduktor yang paling melimpah tersedia di bumi, yang terbuat dari bahan dasar silika. Dan saat ini telah dikembangkan dengan pesat industri semikonduktor silikon, dan telah menjadi pioner pengembangan teknologi tinggi (*high-technology*), disamping semikonduktor berbasis silikon, masih banyak lagi bahan lain seperti germanium (Ge), galium arsenida (GaAs) atau bahan

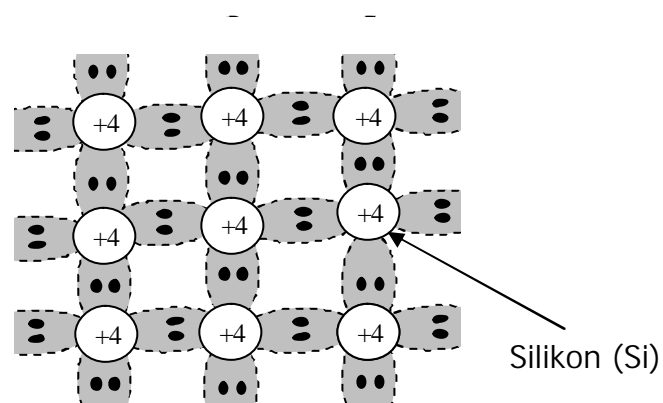
paduan lain (lihat pada Tabel 1) yang juga mempunyai sifat optik dan listrik yang unggul.

Tabel 1. Bahan semikonduktor

| Unsur | Paduan IV-IV | Paduan III-V | Paduan II-VI | Paduan IV-VI |
|----------|--------------|--|--|--------------|
| Si Ge | SiC | AlAs AlSb BN GaAs GaP GaSb InAs InP InSb | CdS CdSe CdTe ZnS ZnSe ZnTe | PbS PbTe |

2) Ikatan Valensi

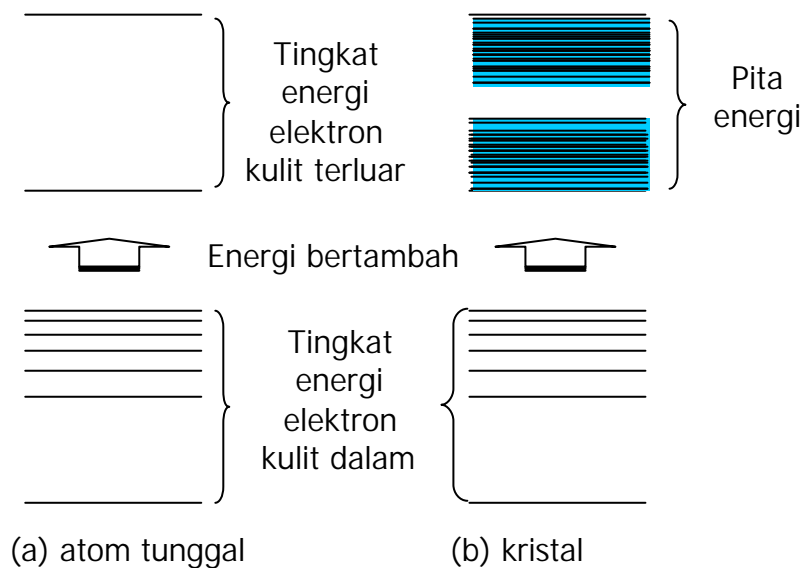
Pada struktur kristal semikonduktor silikon dan germanium, pada umumnya terjadi ikatan kovalen, sehingga kadang disebut kristal kovalen. *Kristal kovalen* adalah kristal yang terbentuk berdasarkan ikatan kovalen, dimana terjadi pemakaian bersama elektron-elektron dan atom-atom penyusunnya, (lihat gambar 1(b) dan (c), atom silikon berikatan dengan 4 atom silikon lainnya yang ada didekanya, karena elektron terluar dari atom silikon ada empat.



Gambar 2. Ikatan kovalen pada semikonduktor Si

3) Pita Energi

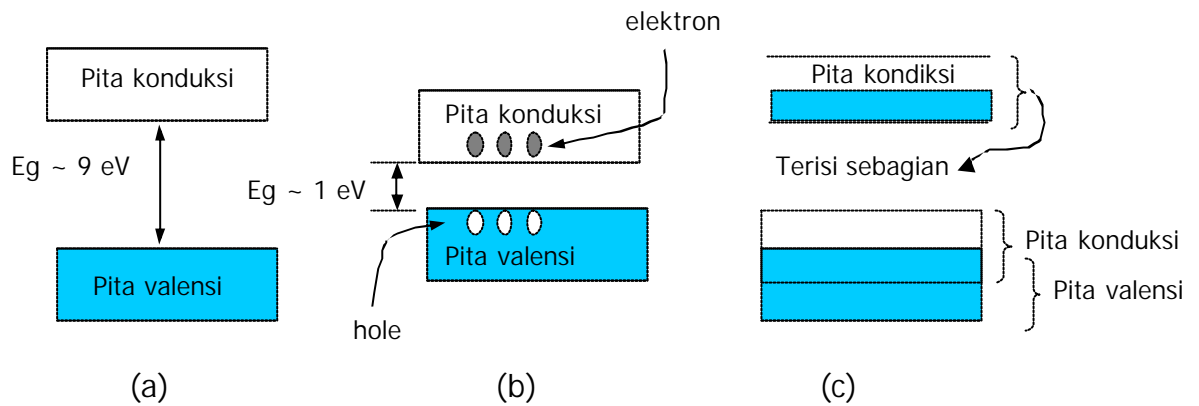
Berangkat dari teori atom, dinyatakan bahwa atom terdiri dari inti atom dan elektron-elektron yang mengelilingi inti atom, elektron berada pada kulit-kulit atom berdasarkan tingkat-tingkat energi tertentu. Semakin jauh dari inti kulit atom yang ditempati oleh elektron, maka energi ikat elektron semakin besar, dan sebaliknya. Tingkat-tingkat energi pada kristal dapat seperti atom tunggal (lihat gambar 3). Interaksi antar atom pada kristal hanya terjadi pada *elektron dikulit terluar (elektron valensi)*. Berdasarkan azas Pauli, pada suatu tingkat energi tidak boleh terdapat lebih dari satu elektron pada keadaan yang sama. Jadi apabila terdapat lebih dari satu elektron pada keadaan yang sama, akan terjadi pergeseran tingkat energi, sehingga tidak pernah terjadi tingkat-tingkat energi yang bertindihan. *Pita energi* adalah kumpulan garis pada tingkat energi yang sama akan saling berhimpit.



Gambar 3. Tingkat energi pada atom tunggal dan pita energi pada kristal

Penentuan pita energi secara rinci dibicarakan di fisika kuantum, namun secara sederhana, akan ditunjukkan sebagai contoh penentuan struktur pita energi pada bahan padat kristal. Pada gambar 4 dapat dilihat ilustrasi struktur pita energi untuk kristal isolator, kristal semikonduktor,

dan kristal isolator. Dimana pada keadaan kesetimbangan (*equilibrium*), pita energi tersplit menjadi dua bagian dan dipisahkan oleh daerah dimana elektron tidak bisa bergerak atau beroperasi, daerah ini disebut *daerah terlarang (=forbidden gap atau band gap)*. Pita atas dinamakan *pita konduksi*, dan pita bagian bawah dinamakan *pita valensi*.



Gambar 4. Struktur pita energi untuk: (a) bahan isolator, (b) bahan semikonduktor, dan (c) bahan isolator

Isolator memiliki struktur pita energi seperti pada gambar 4 (a), dimana pita konduksinya tidak terisi oleh elektron (*kosong*), sedang pada pita valensinya terisi penuh oleh elektron, dan celah energinya cukup besar ~ 9 eV, sehingga bahan isolator tidak bisa menghantarkan listrik. Dan agar elektron dari pita valensi untuk bisa pindah ke pita konduksi dibutuhkan energi eksternal > 9 eV. Semikonduktor memiliki struktur pita energi seperti ditunjukkan pada gambar 4(b), dimana sebagian dari elektron pada pita valensi pindah menuju pita konduksi, sehingga meninggalkan hole pada pita valensi. Kemudahan elektron pindah menuju pita konduksi ini dikarenakan energi gap-nya kecil. Konduktor memiliki struktur kristal seperti ditunjukkan pada gambar 4 (c), dimana pita konduksinya terisi sebagian oleh elektron, dan tidak ada celah energi antara pita valensi dan pita konduksi, sehingga elektron-elektron pada pita valensi sangat mudah untuk pindah menuju pita konduksi. Hal inilah yang

menyebabkan bahan konduktor sangat mudah untuk menghantarkan listrik.

Sebagai gambaran besarnya energi ikat elektron pada kulit atom, telah dirumuskan oleh model atom Bohr: sebagai atom tinjauan adalah atom hidrogen, dimana energi ikat tersebut berbanding terbalik dengan kuadrat bilangan kuantum n yang menunjukkan nomor kulit lintasan elektron, dan secara matematis dinyatakan sebagai berikut:

$$E_n = -\frac{m_0 e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV} \quad (1)$$

Dimana,

m_0 : massa elektron bebas ($= 0,91 \times 10^{-30}$ kg)

e : muatan elektron ($= 1,6 \times 10^{-19}$ C)

h : konstanta plank ($= 6,62 \times 10^{-34}$ J.s)

ϵ_0 : permitivitas pada ruang vakum ($= 8,85 \times 10^{-12}$ F/m)

n : 1, 2, 3, (= nomor kulit atom)

Berdasarkan tingkat kemurnian bahan-nya bahan semikonduktor, dibedakan menjadi 2, yakni semikonduktor intrinsik (*yang belum mengalami pengotoran*), semikonduktor ekstrinsik (*yang sudah mengalami pengotoran*).

4) **Semikonduktor Intrinsik**

Semikonduktor intrinsik adalah semikonduktor yang belum mengalami pengotoran atau pinyisipan oleh atom akseptor atau atom donor. Pada suhu tinggi elektron pada pita valensi dapat berpindah menuju pita konduksi, dengan menciptakan hole pada pita valensi. Dan yang berperan dalam penghantaran listrik pada semikonduktor adalah elektron dan hole, inilah perbedaan prinsip antara bahan konduktor dengan bahan semikonduktor. Rapat keadaan energi yang diizinkan dimiliki oleh elektron yang bergerak pada semikonduktor intrinsik adalah:

$$N(E) = 4 \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{3/2} \sqrt{E} \quad (2)$$

Konsentrasi pembawa muatan pada semikonduktor intrinsik adalah elektron (n) dan hole (p), dan dapat diturunkan dengan menggunakan distribusi fermi dirac, dan secara sederhana dapat diperoleh sebagai berikut:

a. *Rapat pembawa muatan elektron (n):*

$$n = N_c \exp \left(\frac{E_c - E_f}{kT} \right) \quad (3a)$$

atau,

$$n = n_i \exp \left(\frac{E_f - E_i}{kT} \right) \quad (3b)$$

dengan,

$$N_c = 2 \left(\frac{2m_n kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (4)$$

Dimana, N_c adalah rapat keadaan efektif pada pita konduksi, pada temperatur ruang (300 K) untuk silikon (Si) $N_c = 2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ dan untuk galium arsenide (GaAs) $N_c = 4,7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. k adalah konstanta boltzman ($=1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T adalah temperatur mutlak (kelvin), m_n = massa efektif elektron, E_c = tingkat energi konduksi dan E_f adalah tingkat energi fermi. Ingat bahwa elektron berada pada pita konduksi.

b. Rapat pembawa muatan hole (p):

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (5a)$$

atau,

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) \quad (5b)$$

dengan,

$$N_V = 2 \frac{(2\pi m_p kT)^{3/2}}{h^3} \quad (6)$$

Dimana, N_V adalah rapat keadaan efektif pada pita valensi, pada temperatur ruang (300 K) untuk silikon (Si) $N_C = 1,04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ dan untuk galium arsenida (GaAs) $N_C = 7,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. m_p = massa efektif hole dan E_V = tingkat energi valensi.

Untuk bahan semikonduktor intrinsik memiliki kekhususan mengenai jumlah rapat pembawa muatan elektron (n) dan hole (p), yaitu bahwa: "*jumlah elektron persatuan volume pada pita konduksi (n) = jumlah hole persatuan volume pada pita valensi (P)*". Dan selanjutnya jumlah pembawa muatan persatuan volume pada semikonduktor intrinsik (*intrinsic carrier density*) n_i , dinyatakan:

$$n = p = n_i \text{ atau } np = n_i^2 \quad (7)$$

dan

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (8)$$

Dimana, $E_g = (E_C - E_V)$, dan persamaan (7) dikenal dengan *hukum aksi massa* yang berlaku untuk bahan semikonduktor intrinsik maupun

ekstrinsik pada temperatur equilibrium. Hubungan antara energi level fermi E_F dengan energi level konduksi E_C dan energi level valensi E_V , diberikan sebagai berikut:

$$E_F - E_i = \frac{E_C - E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_C} \quad (9)$$

$$= \frac{E_C - E_V}{2} + \frac{3kT}{4} \frac{m_p}{m_n}$$

5) Semikonduktor Ekstrinsik

Semikonduktor ekstrinsik adalah semikonduktor yang telah mengalami pengotoran atau pinyisipan oleh atom akseptor atau atom donor. Pengotoran pada umumnya dilakukan dalam rangka untuk meningkatkan konduktivitas listriknya. Tidak semua atom dapat digunakan sebagai atom akseptor atau atom donor, ada beberapa persyaratan: (1) mempunyai ukuran atom yang hampir sama dengan atom murni (*semikonduktor intrinsik yang akan didoping*), sehingga dapat masuk dan tidak merusak struktur kristal atom murni, (2) memiliki jumlah elektron valensi berbeda satu dengan atom murni. Berdasarkan jumlah elektron valensi atom pengotor ini, maka atom pengotor dibedakan menjadi dua, yaitu: *atom donor dan atom akseptor*. Dan berkaitan dengan hal tersebut semikonduktor ekstrinsik juga dibedakan menjadi dua, yakni: *semikonduktor tipe-n dan semikonduktor tipe-p*.

Konsentrasi pembawa muatan pada semikonduktor ekstrinsik adalah elektron (n) dan hole (p), dan dapat seperti pada persamaan (5) dan (6), sehingga:

a. *Rapat pembawa muatan elektron (n):*

$$n = n_i \exp \frac{E_F - E_i}{kT} \quad (10)$$

b. *Rapat pembawa muatan hole (p):*

$$p = n_i \exp \frac{E_i - E_F}{kT} \quad (11)$$

dimana:

E_F : tingkat energi fermi,

E_i : tingkat energi intrinsik = $\frac{E_c + E_v}{2}$

n_i : konsentrasi pembawa intrinsik (cm^{-3}).

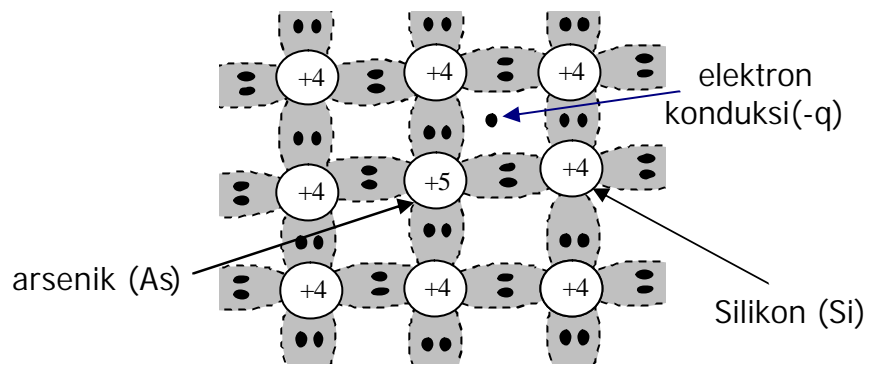
Pada semikonduktor ekstrinsik juga berlaku hubungan: $np = n_i^2$, dengan pendekatan sebagai berikut:

- a. Untuk semikonduktor tipe-n: *semikonduktor intrinsik yang dikotori dengan atom donor (jumlah elektron valensinya 5)*. Ingat atom silikon (Si) atau germanium (Ge) elektron valensinya 4. Dan berlaku: $n \approx N_D$ (*jumlah elektron hampir sama dengan jumlah elektron atom donor*).
- b. Untuk semikonduktor tipe-p: *semikonduktor intrinsik yang dikotori dengan atom akseptor (jumlah elektron valensinya 3)*. Ingat atom silikon (Si) atau germanium (Ge) elektron valensinya 4. Dan berlaku: $p \approx N_A$ (*jumlah hole hampir sama dengan jumlah hole atom akseptor*).

6) Donor dan Akseptor

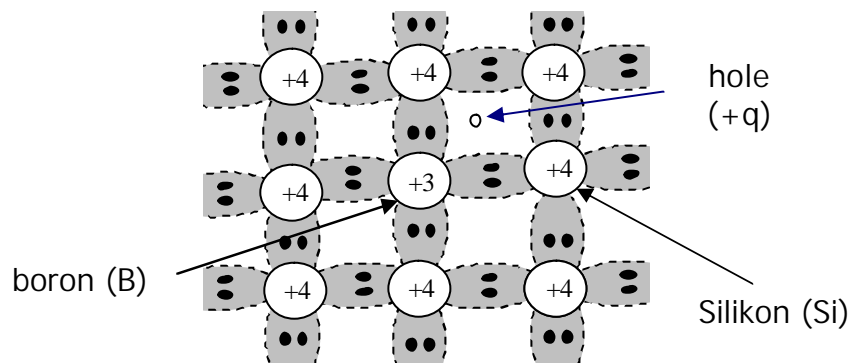
Ketika semikonduktor murni (intrinsik) dikotori dengan memberikan doping atom lain, dengan elektron valensi lebih banyak satu atau kurang satu dari elektron valensi atom semikonduktor intrinsik, maka semikonduktor tersebut kemudian menjadi semikonduktor ekstrinsik. Ketentuan bagi atom pendoping adalah sebagai berikut:

- a. *Atom Donor* adalah atom pengotor yang memberikan kontribusi jumlah elektron berlebih (*jumlah elektronnya lebih banyak satu dari atom murni*). Contoh semikonduktor intrinsik silikon (Si) didoping dengan arsenic (As) (lihat gambar 5).



Gambar 5. Silikon tipe-n, dengan donor (arsenik)

- b. *Atom Akseptor:* adalah atom pengotor yang memberikan kontribusi jumlah hole berlebih (*jumlah elektronnya lebih sedikit satu dari atom murni*). Contoh semikonduktor intrinsik silikon(Si) didoping dengan boron (B) (lihat gambar 6).



Gambar 6. Silikon tipe-n, dengan donor (boron)

Adapun level energi donor E_D (= *energi ionisasi donor*) dapat dikaitkan dengan besaran energi ikat elektron pada kulit atom hidrogen, persamaan (1), dengan hubungan sebagai berikut:

$$E_D = \frac{m_0}{m_n} \frac{1}{\epsilon_s} E_H \quad (12)$$

Dan berlaku hubungan level fermi:

$$E_F = E_V + kT \ln \frac{N_V}{N_D} \quad (13)$$

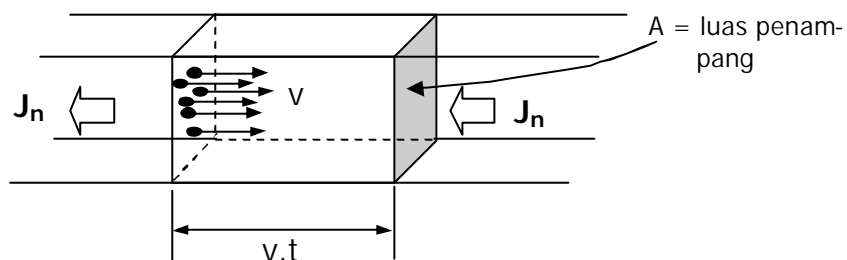
7) Hantaran Listrik Semikonduktor

Gejala penghantaran listrik umumnya secara fisis adalah arus listrik yang dapat diukur dengan ampermeter. Pada bahan logam yang berperan dalam penghantaran listrik adalah elektron yang bergerak bebas pada pita konduksi. Berbeda dengan bahan semikonduktor, yang berperan dalam penghantaran listrik adalah elektron di pita konduksi dan hole di pita valensi.

Berdasarkan mekanisme aliran pembawa (elektron dan hole), dapat dibedakan menjadi dua jenis arus dalam semikonduktor: *arus drift* dan *arus difusi*, yang masing-masing melibatkan elektron dan hole. Hal ini berbeda dengan logam yang hanya ada *arus drift* saja.

a. Arus Drift

Aliran arus drift dapat dijelaskan sebagai berikut, lihat gambar 7 berikut ini:



Gambar 7. Aliran elektron dengan kecepatan v dalam bahan dengan penampang A tegak lurus dengan arah gerak elektron

Jika elektron bergerak dengan kecepatan rata-rata v (= kecepatan hanyut = kecepatan drift), dan rapat pembawa muatan elektron adalah n dalam ruang alirannya, rapat arus (arus persatuan luas penampang) adalah: ($v = -\mu_n ?$)

$$J_n = -en v = -en \mu_n E \quad (A/m^2) \quad (13)$$

Dengan cara yang sama arus drift oleh hole, jika rapat pembawa hole adalah p dalam ruang alirannya, rapat arus drift oleh hole adalah:

$$(v = -\mu_p E).$$

$$J_p = e p v = e \mu_p E \quad (A/m^2) \quad (14)$$

Sehingga *rapat arus drift* total: $J = s E$, dengan s adalah *konduktivitas listrik* ($O-m$) dan E adalah *kuat medan listrik*, μ_n dan μ_p masing-masing adalah *mobilitas elektron dan hole*, adalah:

$$s = e n \mu_n + e p \mu_p \quad (15)$$

persamaan (15) menunjukkan *konduktivitas total* yang dimiliki oleh bahan semikonduktor. Mobilitas elektron dan hole dapat diturunkan berdasarkan teori elektron bebas, dan diperoleh:

$$\mu_n = \frac{e \tau_n}{m_n} \quad \text{dan} \quad \mu_p = \frac{e \tau_p}{m_p} \quad (16)$$

Dimana, τ_n dan τ_p masing-masing adalah waktu relaksasi. Dan harga mobilitas bergantung pada jenis bahan semikonduktor.

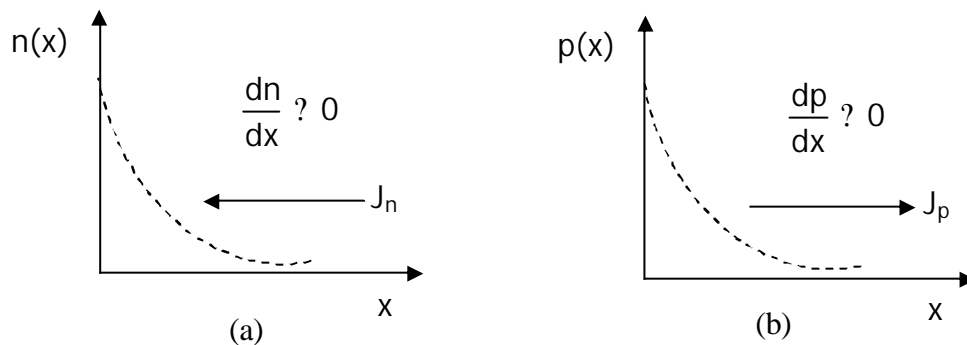
Tabel 2. Mobilitas pembawa pada temperatur kamar

| Jenis kristal semikonduktor | Mobilitas dalam satuan $cm^2/V.s$ | |
|-----------------------------|-----------------------------------|------------------|
| | Elektron (μ_n) | Hole (μ_p) |
| Si | 1.300 | 500 |
| Ge | 4.500 | 3.500 |
| InSb | 77.000 | 750 |
| InPs | 33.000 | 460 |
| InP | 4.600 | 150 |
| GaSb | 4.000 | 1.400 |

b. Arus Difusi

Arus difusi pada bahan semikonduktor terjadi karena adanya aliran elektron atau hole dari konsentrasi tinggi menuju konsentrasi rendah. Arus yang disebabkan karena adanya proses aliran semacam ini disebut *arus difusi*. Hubungan antara distribusi pembawa n dan p terhadap arah arus difusi ditunjukkan pada gambar 8. Dan secara matematis dari uraian tersebut, dapat dinyatakan bahwa rapat arus dan gradien konsentrasi berbentuk linier, yaitu:

$$J_n \approx e D_n \frac{dn}{dx} \text{ dan } J_p \approx e D_p \frac{dp}{dx} \quad (17)$$



Gambar 8. (a) Distribusi elektron dan arus difusi elektron
(b) distribusi hole dan arus difusi hole

Dimana, D_n dan D_p masing-masing adalah koefisien difusi elektron dan hole, dengan satuan m^2/s . Jadi pada prinsipnya arus total adalah merupakan jumlah dari arus drift dan arus difusi yang merupakan kontribusi dari elektron dan hole, namun secara praktis dapat didekati bahwa:

(a). untuk semikonduktor tipe - n

Berlaku hubungan, untuk arus total:

$$J \approx e n v_n \approx e D_n \frac{dn}{dx} \quad (18)$$

(b). untuk semikonduktor tipe - p

Berlaku hubungan, untuk arus total:

$$J \approx e p v_p \approx e D_p \frac{dp}{dx} \quad (19)$$

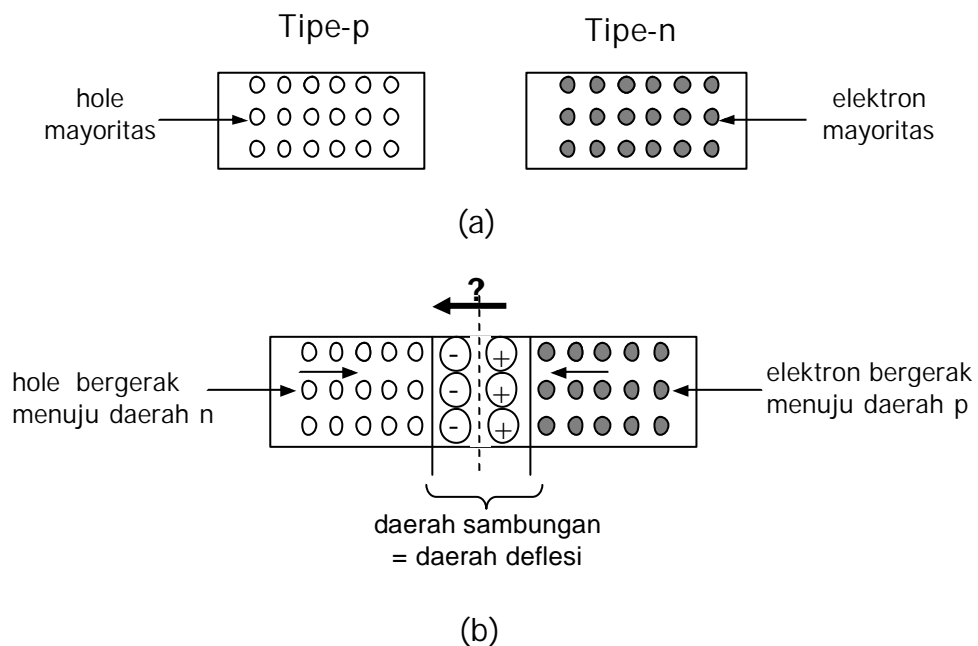
Koefisien difusi D disamping bergantung pada jenis pembawa (elektron atau hole), juga bergantung pada jenis bahannya. Hal ini ditunjukkan oleh hubungan Einstein, sebagai berikut:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e} \quad (20)$$

8) Sambungan p-n Semikonduktor

Sambungan p-n semikonduktor dapat dilakukan dengan menyambungkan semikonduktor tipe-p dengan semikonduktor tipe-n. Semikonduktor tipe-p biasanya hole adalah mayoritas dibandingkan dengan elektron, begitu pula sebaliknya pada semikonduktor tipe-n mayoritas adalah elektron dibanding hole.

Jika semikonduktor tipe-p dan tipe-n disambungkan, maka elektron akan berdifusi menuju daerah tipe-p, dan sebaliknya hole akan berdifusi menuju daerah tipe-n, sehingga terbentuk daerah persambungan. Pada daerah persambungan ini terbebas dari muatan mayoritas (*disebut daerah pengosongan*), tetapi terjadi dipole muatan sehingga timbul medan listrik dan terjadi potensial halang (=beda potensial antara daerah p dan n = *built-in potential*). Lihat ilustrasi pada gambar 9.

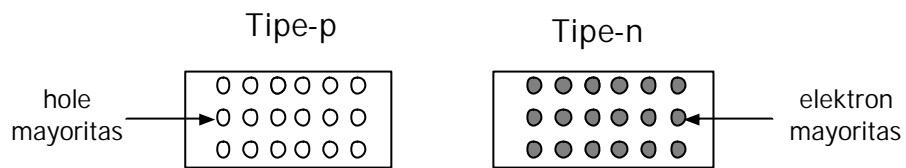


Gambar 9. Pembentukan sambungan p-n

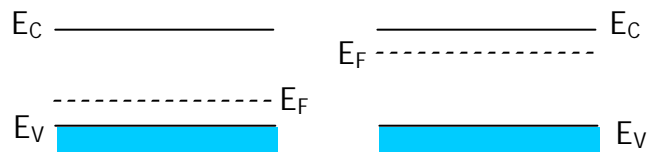
Dan besarnya built-in potensial pada daerah sambungan, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (21)$$

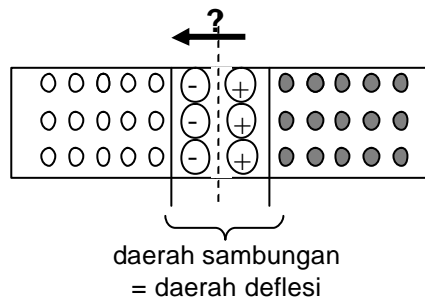
Proses aliran arus pada sambungan (p-n) semikonduktor, diilustrasikan pada gambar 10, berikut ini. Di mana total rapat arus yang mengalir baik oleh elektron maupun hole di daerah persambungan pada temperatur equilibrium sama dengan nol.



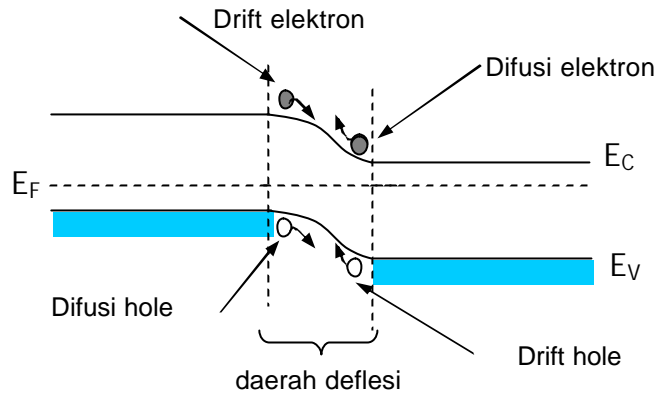
(a) semikonduktor tipe p dan tipe n



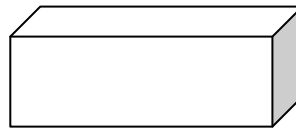
(b) tingkat energi pada semikonduktor tipe p dan tipe n



(c) Pembentukan daerah deflesi pada sambungan p-n

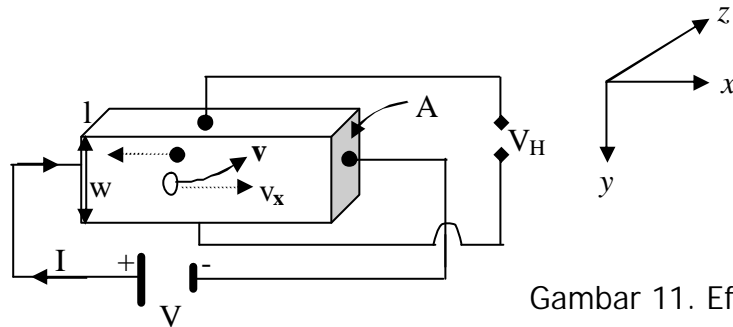


(d) arus difusi dan drift oleh elektron dan hole



Gambar 10. Proses aliran arus pada sambungan p-n

9) **Efek Hall dan Penerapannya**



Gambar 11. Efek Hall

$$\mathbf{B} = B_z \hat{z} \text{ dan } \mathbf{E} = E_y \hat{y}$$

\hat{z} = elektron

\hat{y} = hole

Prinsip dari efek Hall dapat diilustrasikan seperti pada gambar 11. Tinjau sebuah batangan bahan yang mengandung elektron-elektron bebas (*logam maupun semikonduktor*). Batangan tersebut diletakkan dalam medan listik E dan medan magnet B yang saling tegak lurus. Akibatnya elektron-

elektron akan mengalami gaya $-eE$ dan bergerak ke arah sumbu $-x$ dengan kecepatan tertentu v . Bersamaan dengan itu kehadiran B akan mempengaruhi elektron dengan gaya $-evB$ ke arah sumbu $-y$, sehingga elektron-elektron terdorong ke sisi bawah batang, dan menimbulkan medan listrik E_H dalam arah $+y$. proses ini akan terus berlangsung sehingga tercapai medan listrik yang mampu mengimbangi gaya magnet:

$$eE_H = eV_H B \quad (21)$$

Tegangan Hall yang bersangkutan V_H ditentukan oleh: $V_H = E_H \cdot d = V_H B d$ dan dengan mengingat: $J = e n v = I/(l d)$, maka:

$$V_H = \frac{B \cdot I}{l} R_H \quad (22)$$

Dengan R_H didefinisikan, menurut rumus (*disebut koefisien Hall*):

$$R_H = \frac{1}{en} \quad (23)$$

Dengan memasukkan faktor koreksi, maka rumus koefisien Hall di atas, dapat ditulis dengan hubungan:

$$R_H = \frac{3}{8} \frac{1}{en} \quad (\text{untuk elektron}) \quad (24)$$

dan

$$R_H = \frac{3}{8} \frac{1}{ep} \quad (\text{untuk hole}) \quad (25)$$

Penerapan Efek Hall:

Efek Hall dapat digunakan untuk:

- a. Menentukan tipe bahan semikonduktor ekstrinsik
- b. Menentukan besar konsentrasi pembawa (n dan p)

Dari data penguraian efek Hall, diperoleh parameter: I , B , V_H dan I , maka n dan p dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (24) dan persamaan (25):

$$n \approx \frac{8e}{3\mu} (R_H)_{\text{elektron}} \quad \text{dan} \quad p \approx \frac{8e}{3\mu} (R_H)_{\text{hole}} \quad (26)$$

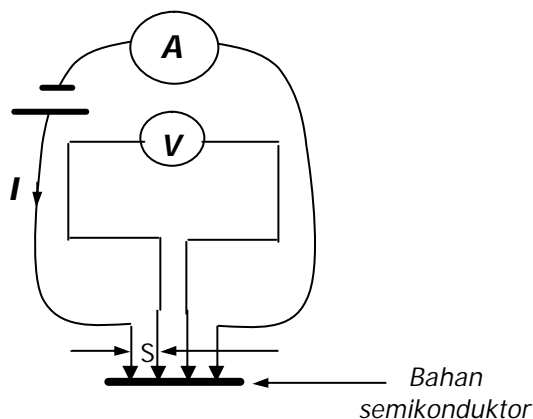
c. Menentukan mobilitas atau konduktivitas bahan

Dari persamaan konduktivitas: $\sigma = e n \mu_n + e p \mu_p$, yang selanjutnya untuk tipe tertentu dari bahan semikonduktor (p atau n), hanya digunakan persamaan: $\sigma = e n \mu_n$ atau $\sigma = e p \mu_p$, sedangkan mobilitas dihitung dari resistivitas ρ , $\mu = \frac{1}{\rho}$, dan dalam

menentukan ρ dapat dilakukan dengan pengukuran dengan metode empat elektroda (pola Werner), sehingga: $\rho = 4 \rho_s \frac{V_H}{I}$, sehingga

mobilitas Hall dapat dihitung dengan:

$$\mu_H = \frac{1}{\rho} R_H \quad (27)$$



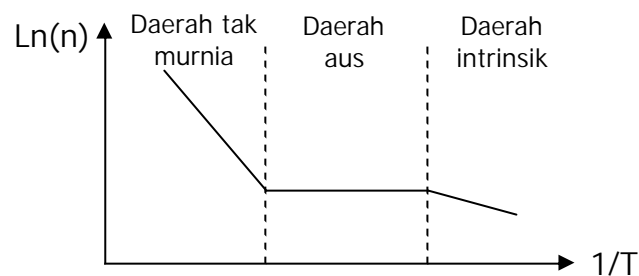
Gambar 12. pengukuran resistivitas ρ

d. Menentukan celah energi E_g

Berangkat dari hubungan konsentrasi pembawa, persamaan (8) dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\ln(n) = \frac{E_g}{2kT} + \frac{1}{T} + \frac{1}{2} \ln(N_V N_C) \quad (28)$$

Dari persamaan tersebut tampak jelas bahwa: E_g adalah gradien kurva $\ln(n)$ terhadap $\frac{1}{T}$, dalam daerah tak murnian (lihat gambar 13).



Gambar 13. Perubahan $\ln(n)$ konsentrasi fungsi ($1/T$)

Contoh soal:

1. Tinjau GaAs yang didoping dengan Te 10^{16} atom/cm³. tentukan konsentrasi pembawa dan tingkat energi fermi pada temperatur ruang.

Penyelesaian:

Bahan semikonduktor Si didoping dengan Te, maka semikonduktor Si menjadi semikonduktor tipe-n, GaAs sebagai atom donor, maka:

$$n \sim N_D = 1 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3 \text{ (konsentrasi elektron)}$$

$$n_i = 1,79 \times 10^6 \text{ atom/cm}^3 \text{ (GaAs: pada } T = 300 \text{ K)}$$

$$N_C = 4,7 \times 10^{17} \text{ atom/cm}^3 \text{ (GaAs: pada } T = 300 \text{ K)}$$

$$N_V = 7,0 \times 10^{18} \text{ atom/cm}^3 \text{ (GaAs: pada } T = 300 \text{ K)}$$

Dengan menggunakan persamaan (7):

$$p \approx \frac{n_i^2}{n} \approx \frac{n_i^2}{N_D} \approx \frac{1,79 \times 10^6}{1,0 \times 10^{16}} \quad (\text{konsentrasi hole})$$

$$\approx 3,20 \times 10^{-3} \text{ atom/cm}^3$$

Gunakan persamaan (3a) dan (3b), sehingga:

Fermi level dari batas bawah pita konduksi:

$$E_C - E_F \approx kT \ln \frac{N_C}{N_D}$$

$$\approx (1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \times (300 \text{ K}) \ln \frac{4,7 \times 10^{17}}{1,0 \times 10^{16}}$$

$$\approx 0,0259 \text{ eV} \times \ln 47$$

$$\approx 0,100 \text{ eV}$$

Fermi level level intrinsik:

$$E_F - E_i \approx kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$\approx (1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \times (300 \text{ K}) \ln \frac{1,0 \times 10^{16}}{1,79 \times 10^6}$$

$$\approx 0,0259 \text{ eV} \times \ln 5,59 \times 10^9$$

$$\approx 0,581 \text{ eV}$$

2. Tentukan konsentrasi elektron dan hole dan tingkat energi fermi sebuah semikonduktor silikon pada temperatur 300 K, jika didoping: (a) Boron 1×10^{15} atom/cm³ dan (b) boron 3×10^{16} atom/cm³, dan (c) arsenik $2,9 \times 10^{16}$ atom/cm³.

Penyelesaian:

- (a). Semikonduktor Si didoping atom Boron: 1×10^{15} atom/cm³ sehingga semikonduktor Si menjadi tipe-p, dan atom B sebagai atom akseptor, sehingga:

$$p \sim N_A = 1,0 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^3 \quad (\text{konsentrasi hole})$$

$$n_i = 1,45 \times 10^{10} \text{ atom/cm}^3 \quad (\text{Si: pada } T = 300 \text{ K})$$

$$N_C = 2,8 \times 10^{19} \text{ atom/cm}^3 \quad (\text{Si: pada } T = 300 \text{ K})$$

$$N_V = 1,04 \times 10^{19} \text{ atom/cm}^3 \text{ (Si: pada } T = 300 \text{ K)}$$

$$N_V = 1,04 \times 10^{19} \text{ atom/cm}^3 \text{ (Si: pada } T = 300 \text{ K)}$$

Dengan menggunakan persamaan (7):

$$n \approx \frac{n_i^2}{p} \approx \frac{n_i^2}{N_A} \approx \frac{(1,45 \times 10^{10})^2}{1,0 \times 10^{15}} \text{ (konsentrasi elektron)}$$

$$\approx 2,1 \times 10^5 \text{ atom / cm}^3$$

Gunakan persamaan (5a) dan (5b), sehingga:

Fermi level dari atas pita valensi:

$$E_F - E_V \approx kT \ln \frac{N_V}{N_A}$$

$$\approx (1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \times (300 \text{ K}) \ln \frac{1,04 \times 10^{19}}{1,0 \times 10^{15}}$$

$$\approx 0,0259 \text{ eV} \times \ln 10400$$

$$\approx 0,240 \text{ eV}$$

Fermi level level intrinsik:

$$E_i - E_F \approx kT \ln \frac{N_A}{n_i}$$

$$\approx (1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \times (300 \text{ K}) \ln \frac{1,0 \times 10^{15}}{1,45 \times 10^{10}}$$

$$\approx 0,0259 \text{ eV} \times \ln 68965,52$$

$$\approx 0,289 \text{ eV}$$

(b). Semikonduktor Si didoping atom Boron: $3 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$

sehingga semikonduktor Si menjadi tipe-p, dan atom B

sebagai atom akseptor, sehingga:

$$p \sim N_A = 3,0 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3 \text{ (konsentrasi hole)}$$

Dengan menggunakan persamaan (7):

$$n \approx \frac{n_i^2}{p} \approx \frac{n_i^2}{N_A} \approx \frac{(1,45 \times 10^{10})^2}{3,0 \times 10^{16}} \text{ (konsentrasi elektron)}$$

$$\approx 7,0 \times 10^3 \text{ atom / cm}^3$$

Gunakan persamaan (5a) dan (5b), sehingga:

Fermi level dari atas pita valensi:

$$E_F - E_V = kT \ln \frac{N_V}{N_A}$$

$$= (1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}) \cdot (300 \text{ K}) \ln \frac{1,04 \cdot 10^{19}}{3,0 \cdot 10^{16}}$$

$$= 0,0259 \text{ eV} \cdot \ln 346,67$$

$$= 0,151 \text{ eV}$$

Fermi level level fermi intrinsik:

$$E_i - E_F = kT \ln \frac{N_A}{n_i}$$

$$= (1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}) \cdot (300 \text{ K}) \ln \frac{3,0 \cdot 10^{16}}{1,45 \cdot 10^{10}}$$

$$= 0,0259 \text{ eV} \cdot \ln 2068965,517$$

$$= 0,377 \text{ eV}$$

(c). Semikonduktor Si didoping atom Arsenik: $2,9 \times 10^{16}$ atom/cm³

sehingga semikonduktor Si menjadi tipe-n, dan atom As sebagai atom donor, sehingga:

$$n \sim N_D = 2,9 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3 \text{ (konsentrasi elektron)}$$

Dengan menggunakan persamaan (7):

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{1,45 \cdot 10^{10}}{2,9 \cdot 10^{16}} \text{ (konsentrasi hole)}$$

$$= 7,25 \cdot 10^3 \text{ atom/cm}^3$$

Gunakan persamaan (3a) dan (3b), sehingga:

Fermi level dari batas bawah pita konduksi:

$$E_C - E_F = kT \ln \frac{N_C}{N_D}$$

$$= (1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}) \cdot (300 \text{ K}) \ln \frac{2,8 \cdot 10^{19}}{2,9 \cdot 10^{16}}$$

$$= 0,0259 \text{ eV} \cdot \ln 965,517$$

$$= 0,178 \text{ eV}$$

Fermi level intrinsik:

$$E_F = E_i + kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$= (1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) (300 \text{ K}) \ln \frac{2,9 \times 10^{16}}{1,45 \times 10^{10}}$$

$$= 0,0259 \text{ eV} \ln 2 \times 10^6$$

$$= 0,376 \text{ eV}$$

3. Tentukan resistivitas pada temperatur ruang sebuah semikonduktor tipe-n yang didoping dengan posfor 10^{16} atom/cm³.

Penyelesaian:

Pada temperatur kamar, anggap semua donor terionisasi, sehingga: $n \sim N_D = 1,0 \times 10^{16}$ atom/cm³ (*konsentrasi elektron*)

Dan karena mayoritas konsentrasi pembawa adalah elektron, maka kontribusi hole dapat diabaikan, sehingga:

$$\rho = \frac{1}{en\mu_n + eN_D\mu_n}$$

$$\text{Resistivitas } \rho = \frac{1}{1,6 \times 10^{19} \times 1300}$$

$$= 0,48 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$$

Catatan: mobilitas konsentrasi pembawa n untuk semikonduktor silikon dengan atom pengotor $N_D \sim 10^{16}$ atom/cm³ adalah 1300 cm/V.s.

4. Tinjau sebuah sampel Si yang didoping dengan atom posphor 2×10^{16} atom/cm³. Tentukan koefisien Hall dan tegangan Hall didalam sampel, jika parameter sampel adalah: $l = 500 \mu \text{ m}$, $A = 2,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, $I = 1 \text{ mA}$ dan $B = 10^{-4} \text{ Wb/cm}^2$.

Penyelesaian:

Gunakan rumus: koefisien Hall

$$R_H = \frac{1}{en} = \frac{1}{eN_D}$$

$$= \frac{1}{1,6 \cdot 10^{19} \cdot 2,0 \cdot 10^{16}}$$

$$= 312,5 \text{ cm}^3 / \text{C}$$

Dan tegangan Hall:

$$V_H = R_H \frac{I}{A} B_z$$

$$= 312,5 \cdot \frac{10^{-3}}{2,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-4} = 500 \cdot 10^{-4}$$

$$= 0,625 \text{ mV}$$

5. Sampel semikonduktor silikon (Si) dengan jenis doping belum diketahui, jika dilakukan pengukuran efek Hall dan diperoleh informasi: $l = 0,05 \text{ cm}$, $A = 1,6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, $I = 2,5 \text{ nA}$, $B = 30 \text{ nT}$ ($1 \text{ T} = 10^4 \text{ Wb/cm}^2$) dan $V = +10 \text{ Volt}$. Catatan: pada $T = 300 \text{ K}$, $n_i = 1,45 \times 10^{10} \text{ atom/cm}^3$. Tentukan: (a) koefisien Hall, (b) tipe konduktivitas, (c) pembawa mayoritas, (d) resistivitas, dan (e) mobilitas sampel semikonduktor.

Penyelesaian:

(a) koefisien Hall:

$$R_H = \frac{V_H \cdot A}{I \cdot B \cdot l} = \frac{10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 10^{-9} \cdot 30 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}$$

$$= 4,27 \cdot 10^{10} \text{ cm}^2 / \text{C}$$

(b) tipe konduktivitas:

$$p = \frac{1}{eR_H} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{19} \cdot 4,27 \cdot 10^{10}}$$

$$= 1,46 \cdot 10^8 \text{ atom / cm}^3$$

dan,

$$n \approx \frac{n_i^2}{p} \approx \frac{(1,45 \times 10^{10})^2}{1,46 \times 10^8} \approx 1,44 \times 10^{12} \text{ atom/cm}^3$$

Karena jumlah konsentrasi pembawa, yakni elektron lebih besar dari hole, maka tipe konduktivitasnya adalah tipe-n.

(c) pembawa mayoritas adalah elektron: $1,44 \times 10^{12} \text{ atom/cm}^3$.

(d) resistivitas: $\rho \approx \frac{1}{q n \mu_n} \approx 1,2 \times 10^3 \text{ (}\Omega \cdot \text{cm)}$

(e) mobilitas:

$$\mu_n \approx \frac{1}{q n \rho} \approx \frac{1}{1,6 \times 10^{19} \times 1,44 \times 10^{12} \times 1,2 \times 10^3} \approx 3.615 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$$

6. Tentukan resistivitas ρ dari semikonduktor intrinsik: (a) silikon (Si), dan (b) Gallium Arsenida (GaAs) pada temperatur kamar. Catatan: pada temperatur kamar ($T = 300 \text{ K}$)

| | Silikon (Si) | Gallium Arsenida (GaAs) |
|---------|-----------------------|-------------------------|
| μ_n | 1450 | 8500 |
| μ_p | 450 | 400 |
| n_i | $1,45 \times 10^{10}$ | $1,79 \times 10^6$ |

Penyelesaian:

(a) Untuk semikonduktor intrinsik Si, pada temperatur kamar ($T=300$ K), maka berlaku: $n = p = n_i = 1,45 \times 10^{10}$ atom/cm³.

Konduktivitas:

$$\begin{aligned} \sigma &= e(n\mu_n + p\mu_p) \\ &= 1,6 \times 10^{19} (1.450 + 450) \times 1,45 \times 10^{10} \\ &= 4,408 \times 10^{26} \text{ (O } \Omega \text{ cm)}^{-1} \end{aligned}$$

dan resistivitasnya:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{4,408 \times 10^{26}} = 2,269 \times 10^{-5} \text{ O } \Omega \text{ cm}$$

(b) Untuk semikonduktor intrinsik GaAs, pada temperatur kamar ($T=300$ K), maka berlaku: $n = p = n_i = 1,79 \times 10^6$ atom/cm³.

Konduktivitas:

$$\begin{aligned} \sigma &= e(n\mu_n + p\mu_p) \\ &= 1,6 \times 10^{19} (8.500 + 400) \times 1,79 \times 10^6 \\ &= 2,55 \times 10^{29} \text{ (O } \Omega \text{ cm)}^{-1} \end{aligned}$$

dan resistivitasnya:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{2,55 \times 10^{29}} = 3,923 \times 10^{-8} \text{ O } \Omega \text{ cm}$$

7. Tentukan: n , p , konduktivitas σ dan resistivitas ρ dari sampel semikonduktor silikon pada temperatur kamar, jika didoping dengan atom: (a) Boron 5×10^{15} atom/cm³, (b) Arsenik $1,5 \times 10^{16}$ atom/cm³, dan (c) Gallium 10^{17} atom/cm³. (mobilitas konsentrasi pembawa karena doping atom donor masing-masing adalah $\mu_p = 450$ boron $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 1300$ arsenik $1,5 \times 10^{16}$, dan $\mu_p = 250$ Gallium 10^{17} cm^{-3}).

Penyelesaian:

(a) untuk atom doping boron (B): $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^3$

$$\bullet \quad n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{1,45 \times 10^{10}^2}{5 \times 10^{15}}, \text{ dan } p = N_A \\ = 4,21 \times 10^4 \text{ atom / cm}^3$$

• Mobilitas $\mu_p = 450$ (atom doping boron $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)

• Konduktivitasnya:

$$\sigma = e p \mu_p = e N_A \mu_p \\ = 1,6 \times 10^{19} \times 5 \times 10^{15} \times 450 \\ = 0,36 \text{ (O } \Omega \text{ cm)}^{-1}$$

$$\bullet \quad \text{Resistivitas: } \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{0,36} = 2,78 \text{ O } \Omega \text{ cm}$$

(b) untuk atom doping Arsenik (As): $N_D = 1,5 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$

$$\bullet \quad p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{1,45 \times 10^{10}^2}{1,5 \times 10^{16}}, \text{ dan } n = N_D \\ = 1,40 \times 10^4 \text{ atom / cm}^3$$

• Mobilitas $\mu_n = 1.300$

(atom doping arsenik $1,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)

• Konduktivitasnya:

$$\sigma = e n \mu_n = e N_D \mu_n \\ = 1,6 \times 10^{19} \times 1,5 \times 10^{16} \times 1.300 \\ = 3,12 \text{ (O } \Omega \text{ cm)}^{-1}$$

$$\bullet \quad \text{Resistivitas: } \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{3,12} = 0,320 \text{ O } \Omega \text{ cm}$$

(c) untuk atom doping gallium (Ga): $N_A = 1 \times 10^{17} \text{ atom/cm}^3$

$$\bullet \quad n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{1,45 \times 10^{10}^2}{1 \times 10^{17}}, \text{ dan } p = N_A \\ = 2,102 \times 10^4 \text{ atom / cm}^3$$

• Mobilitas $\mu_p = 250$ (atom doping gallium $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)

• Konduktivitasnya:

$$\rho = \frac{1}{e \mu_p p + e N_A} \approx \frac{1}{e N_A} \approx \frac{1}{1,6 \times 10^{19} \times 1 \times 10^{17} \times 250} \approx 4,0 \text{ (}\Omega \cdot \text{cm)}^{-1}$$

✿ Resistivitas: $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{4,0} = 0,25 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$

8. Hitung *built-in potential* untuk sambungan p-n semikonduktor silikon dengan $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ dan $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ pada temperatur kamar (300K).

Penyelesaian:

Gunakan persamaan (21), sehingga:

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$= \frac{1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 300 \text{ K}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} \ln \frac{10^{18} \times 10^{15}}{(1,45 \times 10^{10})^2}$$

$$= 0,0259 \text{ eV} \times \ln 4,76 \times 10^{12}$$

$$= 0,756 \text{ eV}$$

c. Rangkuman

- ✍ Berdasarkan struktur partikel (atom, ion, atau molekul) penyusunnya, bahan padat dibagi menjadi dua jenis yaitu *bahan padat kristal* dan *bahan padat amorf*. *Bahan padat kristal* adalah bahan padat yang struktur partikel penyusunnya memiliki keteraturan panjang dan berulang secara periodik. *Bahan padat amorf* adalah bahan padat yang struktur partikel penyusunnya memiliki keteraturan yang pendek.
- ✍ *Kristal kovalen* adalah kristal yang terbentuk berdasarkan ikatan kovalen, dimana terjadi pemakaian bersama elektron-elektron dan atom-atom penyusunnya.

- ✍ *Pita energi* adalah kumpulan garis pada tingkat energi yang sama akan saling berhimpit.
- ✍ Berdasarkan tingkat kemurnian bahannya bahan semikonduktor, dibedakan menjadi 2, yakni semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik.
- ✍ *Semikonduktor intrinsik* adalah semikonduktor yang belum mengalami pengotoran atau penyisipan oleh atom akseptor atau atom donor.
- ✍ *Semikonduktor ekstrinsik* adalah semikonduktor yang telah mengalami pengotoran atau penyisipan oleh atom akseptor atau atom donor, sehingga menjadi semikonduktor tipe-p atau semikonduktor tipe-n.
- ✍ *Atom Donor*: adalah atom pengotor yang memberikan kontribusi jumlah elektron berlebih (*jumlah elektronnya lebih banyak satu dari atom murni*). Contoh semikonduktor intrinsik silikon(Si) didoping dengan arsenic (As).
- ✍ *Atom Akseptor*: adalah atom pengotor yang memberikan kontribusi jumlah hole berlebih (*jumlah elektronnya lebih sedikit satu dari atom murni*). Contoh semikonduktor intrinsik silikon(Si) didoping dengan boron (B).
- ✍ Berdasarkan mekanisme aliran pembawa (elektron dan hole), dapat dibedakan menjadi dua jenis arus dalam semikonduktor: *arus drift dan arus difusi*.
- ✍ Rapat arus Drift: $J_n = e n v_n$ & $J_p = e p v_p$
- Rapat arus Difusi: $J_n = e D_n \frac{dn}{dx}$ dan $J_p = e D_p \frac{dp}{dx}$
- ✍ Secara praktis dapat dilakukan pendekatan:
 - (a). untuk semikonduktor tipe - n
 Berlaku hubungan, untuk arus total:

$$J = e n v_n + e D_n \frac{dn}{dx}$$

(b). untuk semikonduktor tipe - p

Berlaku hubungan, untuk arus total:

$$J = e n_p v_p + e D_p \frac{dp}{dx}$$

✍ Dan besarnya potensial built-in potensial pada daerah sambungan, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

d. Tugas

Jelaskan apakah konduktivitas listrik dipengaruhi oleh temperatur.

1. Jelaskan apa yang berfungsi sebagai pembawa muatan pada semikonduktor tipe-n, tipe-p dan semikonduktor intrinsik.
2. Jelaskan bagaimana caranya membuat bahan semikonduktor intrinsik menjadi bahan semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n, sebutkan persyaratan utamanya.
3. Jelaskan apa yang saudara ketahui tentang pita terlarang (*band gap*), dan apakah semua jenis bahan punya band gap dan sebutkan perbedaan prinsipnya.
4. Jelaskan apa perbedaan prinsip takmurnian donor dan takmurnian akseptor, apa perbedaan prinsip semikonduktor tipe-n dan semikonduktor tipe-p.
5. Jelaskan apa perbedaan pembawa mayoritas dan pembawa minoritas pada semikonduktor tipe-n dan semikonduktor tipe-p.
6. Jelaskan apa yang saudara ketahui tentang: tingkat energi fermi, tingkat energi donor, energi konduksi, dan energi valensi, jika perlu lengkapi dengan gambar.
7. Jelaskan faktor apa saja yang mempengaruhi *konduktivitas*, *resistivitas* dan *mobilitas listrik* pada bahan semikonduktor. Dan

sebutkan dalam mekanisme hantaran listrik apa yang berperan untuk menghantarkan, apa bedanya dengan bahan konduktor.

8. Apa yang saudara ketahui tentang: *arus drift*, *arus difusi*, *waktu relaksasi*, *daerah deflesi*, dan *built-in potential*. Jelaskan.
9. Apa yang saudara ketahui tentang efek Hall, apa saja manfaat dari efek Hall sebutkan. Jika dalam percobaan Hall diperoleh data $V_H = 10 \text{ mV}$, $l = 5 \text{ mm}$, $I = 10 \text{ Amper}$, dan $B = 1 \text{ Tesla}$, berapa hambatan Hall -nya.

e. Tes Formatif

1. Tentukan konduktivitas s pada temperatur ruang sebuah semikonduktor tipe-n yang didoping dengan arsenida $10^{18} \text{ atom/cm}^3$. (catatan: pada $T=300\text{K}$, $\mu_n = 1.300 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$).
2. Sebutkan apa saja manfaat dari pengukuran efek Hall sebutkan. Jika dalam percobaan Hall diperoleh data $V_H = -10 \text{ mV}$, $l = 4 \text{ mm}$, $A=2,5 \text{ mm}^2$, $I = 10 \text{ mA}$, dan $B = 10 \text{ Tesla}$, berapa hambatan hall-nya.
3. Hitung *built-in potential* untuk sambungan p-n semikonduktor silikon dengan $N_A = 1,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ dan $N_D = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ pada temperatur kamar (300K).
4. Tentukan: n , p , dan konduktivitas s dari sampel semikonduktor silikon pada temperatur kamar, jika didoping dengan atom: (a) Boron $1,5 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^3$ ($\mu_p = 450$), (b) Arsenik $3,0 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$ ($\mu_n = 1300$), dan (c) Gallium $2 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$ ($\mu_p = 250$).
5. Tentukan konduktivitas s dari semikonduktor intrinsik: (a) silikon (Si), dan (b) Gallium Arsenida (GaAs) pada temperatur kamar.

Catatan: pada temperatur kamar ($T = 300 \text{ K}$)

| | Silikon (Si) | Gallium Arsenida (GaAs) |
|---------|-----------------------|-------------------------|
| μ_n | 1450 | 8500 |
| μ_p | 450 | 400 |
| n_i | $1,45 \times 10^{10}$ | $1,79 \times 10^6$ |

6. Tinjau sebuah sampel Si yang didoping dengan atom boron $1,2 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$. Tentukan koefisien Hall dan tegangan Hall didalam sampel, jika parameter sampel adalah: $l = 250 \mu \text{ m}$, $A = 2,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, $I = 10 \text{ mA}$ dan $B = 10^{-3} \text{ Wb/cm}^2$.
7. Tentukan konsentrasi elektron dan hole dan tingkat energi fermi sebuah semikonduktor silikon pada temperatur 300 K, jika didoping: (a) boron $1,5 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$, dan (c) arsenik $2,5 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$. (catatan: $n_i = 1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $N_C = 2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_V = 1,04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ dan $kT = 0,0259 \text{ eV}$).
8. Jelaskan faktor apa saja yang mempengaruhi *konduktivitas*, pada bahan semikonduktor. Dan sebutkan dalam mekanisme hantaran listrik apa yang berperan untuk menghantarkan, apa bedanya dengan bahan konduktor.
9. Jelaskan bagaimana caranya membuat bahan semikonduktor intrinsik menjadi bahan semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n, sebutkan persyaratannya.
10. Tuliskan persamaan yang menyatakan rapat elektron (n) atau rapat hole (p) masing-masing pada pita konduksi dan pita valensi pada semikonduktor intrinsik.
11. Tuliskan persamaan yang menyatakan hubungan antara rapat pembawa muatan intrinsik terhadap N_V , N_C dan energi gap E_g .

f. Kunci Jawaban Tes Formatif

1. $s = 208 \text{ (}\Omega\text{-cm)}^{-1}$
2. (a). manfaat pengukuran dengan efek Hall:
 - (1) menentukan jenis semikonduktor ekstrinsik
 - (2) menentukan konsentrasi pembawa (n dan p)
 - (3) menentukan mobilitas Hall
 - (4) Menentukan energi gap semikonduktor(b). $R_H = 6.250 \text{ cm}^3/\text{C}$
3. $V_{bi} = 0,904 \text{ eV}$
4. (a) doping boron (B):
$$p = 1,5 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^3$$
$$n = 1,4 \times 10^5 \text{ atom/cm}^3$$
$$s = 0,108 \text{ (}\Omega\text{-cm)}^{-1}$$
(b) doping atom arsenida (As):
$$p = 7,0 \times 10^3 \text{ atom/cm}^3$$
$$n = 3,0 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$$
$$s = 6,24 \text{ (}\Omega\text{-cm)}^{-1}$$
(c) doping atom gallium (Ga):
$$p = 2,0 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$$
$$n = 1,05 \times 10^4 \text{ atom/cm}^3$$
$$s = 0,80 \text{ (}\Omega\text{-cm)}^{-1}$$
5. (a) Semikonduktor Si: $s = 4,4 \times 10^{-6} \text{ (}\Omega\text{-cm)}^{-1}$
(b) Semikonduktor GaAs: $s = 2,6 \times 10^{-9} \text{ (}\Omega\text{-cm)}^{-1}$
6. (a) $R_H = 312,5 \text{ cm}^3/\text{C}$, (b) $V_H = 31,25 \text{ mV}$
7. (a) doping boron (B):
$$p = 1,5 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$$
$$n = 1,4 \times 10^4 \text{ atom/cm}^3$$
$$E_F - E_V = 0,169 \text{ eV dan } E_i - E_F = 0,359 \text{ eV}$$
(b) doping atom arsenida (As):
$$p = 8,4 \times 10^3 \text{ atom/cm}^3$$
$$n = 2,5 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$$

$$E_C - E_F = 0,182 \text{ eV} \text{ dan } E_F - E_i = 0,372 \text{ eV}$$

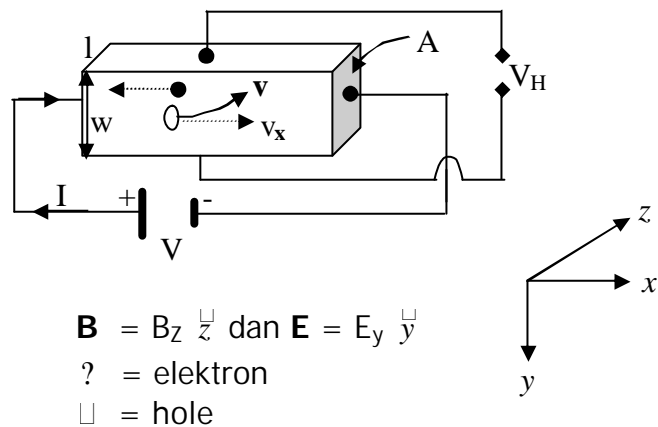
8. (a) faktor yang berpengaruh terhadap konduktivitas: *mobilitas, jumlah konsentrasi pembawa, muatan elektron. Konduktivitas juga dipengaruhi oleh temperatur ($\propto \sqrt{T}^{-1}$)* Dan yang berperan dalam penghantaran listrik pada bahan semikonduktor adalah elektron dan hole, sedang pada bahan konduktor hanya elektron saja.
9. Yaitu dengan memberikan atom doping/pengotor pada semikonduktor intrinsik: atom donor membentuk bahan semikonduktor tipe-n, dan atom akseptor membentuk bahan semikonduktor tipe-p. Persyaratan atom doping adalah: *ukuran atom doping harus sama dengan ukuran atom bahan semikonduktor intrinsik. Atom donor elektron valensinya harus lebih banyak satu dari elektron valensi atom intrinsik, atom akseptor elektron valensinya harus kurang satu dari elektron valensi atom intrinsik.*
10. $n = N_C \exp\left\{-\frac{E_C - E_F}{kT}\right\}$ dan $p = N_V \exp\left\{-\frac{E_V - E_F}{kT}\right\}$
11. $n = p = n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left\{-\frac{E_g}{2kT}\right\}$, atau:
 $\ln(n) = -\frac{E_g}{2kT} + \frac{1}{2} \ln N_C N_V$

g. Lembar Kerja

Identifikasi tipe semikonduktor ekstrinsik dengan eksperimen Hall

Efek Hall pada semikonduktor tipe-n akan menghasilkan tegangan Hall yang berlawanan polaritas dengan tegangan Hall yang dihasilkan pada semikonduktor tipe-p dalam medan listrik ? dan medan magnet B yang sama.

Peristiwa tersebut dapat dipahami karena hole yang bermuatan positif bergerak dalam arah yang berlawanan dengan elektron mengalami gaya magnet yang sama, sehingga terkumpul disalah satu sisi bahan semikonduktor. Dengan demikian akan terjadi medan listrik Hall dengan polarisasi yang berlawanan dengan kasus semikonduktor tipe-n.



BAB III. EVALUASI

A. Tes Tertulis

1. Tentukan resistivitas pada temperatur ruang sebuah semikonduktor tipe-n yang didoping dengan arsenida 10^{18} atom/cm³.
2. Jika dalam percobaan Hall dipakai semikonduktor silikon tipe-n diperoleh data $V_H = -10$ mV, $l = 5$ mm, $A = 5$ mm², $I = 10$ Amper, dan $B = 2,5$ Tesla, tentukan: konsentrasi pembawa (n) dan konduktivitasnya.
3. Hitung *built-in potential* untuk sambungan p-n semikonduktor silikon dengan $N_A = 2,5 \times 10^{18}$ cm⁻³ dan $N_D = 1,2 \times 10^{16}$ cm⁻³ pada temperatur kamar (300K).
4. Tentukan: n , p , dan resistivitas ? dari sampel semikonduktor silikon pada temperatur kamar, jika didoping dengan atom: (a) Boron $2,5 \times 10^{15}$ atom/cm³ ($\mu_p = 450$), (b) Arsenik 5×10^{16} atom/cm³ ($\mu_n = 1300$),
5. Tentukan resistivitas ? dari semikonduktor intrinsik: (a) silikon (Si), dan (b) Gallium Arsenida (GaAs) pada temperatur kamar.
6. Tinjau sebuah sampel Si yang didoping dengan atom posphor $2,4 \times 10^{15}$ atom/cm³. Tentukan koefisien Hall dan tegangan Hall didalam sampel, jika parameter sampel adalah: $l = 500$ μ m, $A = 10$ mm², $I = 1$ mA dan $B = 10^{-4}$ Wb/cm².
7. Tentukan konsentrasi elektron dan hole dan tingkat energi fermi sebuah semikonduktor GaAs pada temperatur 300 K, jika didoping: (a) Berillium (Be) 3×10^8 atom/cm³, dan (b) Timah (Sn) $2,3 \times 10^8$ atom/cm³.
8. Tuliskan persamaan yang menyatakan rapat arus elektron (n) atau rapat arus hole (p) yang merupakan kontribusi dari arus drift dan arus difusi, tulis juga total rapat arus pada bahan semikonduktor.

9. Tentukan koefisien difusi semikonduktor silikon Si pada temperatur kamar ($T=300\text{K}$, $\mu_n = 1450$, $\mu_p = 450$).

B. Kunci Jawaban

1. $\tau = 4,81$ (O-cm)
2. $n = 1,56 \times 10^{21}$ atom/cm³ dan $s = 3,62 \times 10^5$ (O-cm)⁻¹
3. $V_{bi} = 0,844$ eV
4. (a) doping boron (B):
 - $p = 2,5 \times 10^{15}$ atom/cm³
 - $n = 8,4 \times 10^4$ atom/cm³
 - $\tau = 5,56$ (O-cm)
 (b) doping atom arsenida (As):
 - $p = 4,2 \times 10^3$ atom/cm³
 - $n = 5,0 \times 10^{16}$ atom/cm³
 - $\tau = 0,096$ (O-cm)
5. (a) Semikonduktor Si: $\tau = 3,9 \times 10^8$ (O-cm)
 (b) Semikonduktor GaAs: $\tau = 2,27 \times 10^5$ (O-cm)
6. (a) $R_H = -2,6 \times 10^3$ cm³/C , (b) $V_H = -0,13$ mV
7. (a) doping berillium (Be):
 - $p = 3,0 \times 10^8$ atom/cm³
 - $n = 1,07 \times 10^4$ atom/cm³
 - $E_F - E_V = 0,618$ eV dan $E_i - E_F = 0,133$ eV
 (b) doping atom timah (Sn):
 - $p = 1,39 \times 10^4$ atom/cm³
 - $n = 2,3 \times 10^8$ atom/cm³
 - $E_C - E_F = 0,555$ eV dan $E_F - E_i = 0,126$ eV.

8. Rapat arus total kontribusi konsentrasi pembawa (n dan p) adalah:

$$J_n = e n v_n + D_n \frac{dn}{dx}$$

dan,

$$J_p = e p v_p + D_p \frac{dp}{dx}$$

sehingga, $J_{\text{Total}} = e n v_n + p v_p + e \left(D_n \frac{dn}{dx} + D_p \frac{dp}{dx} \right)$

9. $D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = 0,0259 \text{ eV} \cdot 1.450 = 37,56$

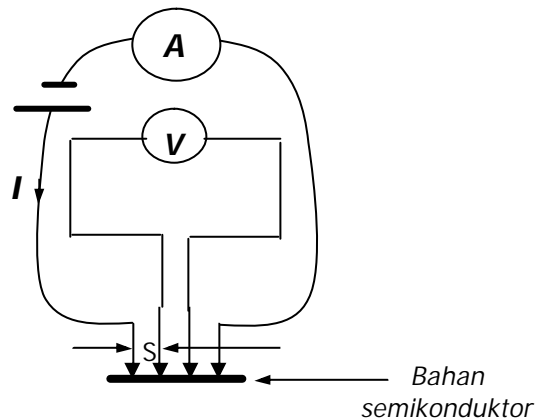
$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = 0,0259 \text{ eV} \cdot 450 = 11,66$$

B. Tes Praktek

Menentukan mobilitas atau konduktivitas bahan

Dari persamaan konduktivitas : $\sigma = e(n_n \mu_n + n_p \mu_p)$, yang selanjutnya untuk tipe tertentu dari bahan semikonduktor (p atau n), hanya digunakan persamaan : $\sigma_n = e n \mu_n$ atau $\sigma_p = e n_p \mu_p$, sedangkan mobilitas dihitung dari resistivitas ρ , $\mu = \frac{1}{\rho}$, dan dalam menentukan ρ dapat dilakukan dengan pengukuran dengan *metode empat elektroda (pola Werner)*, sehingga : $\rho = 4 \rho_s \frac{V_H}{I}$, sehingga mobilitas Hall dapat dihitung dengan:

$$\mu = \frac{1}{\rho} R_H$$



LEMBAR PENILAIAN TES PESERTA

Nama Peserta :
 No. Induk :
 Program Keahlian :
 Nama Jenis Pekerjaan :

PEDOMAN PENILAIAN

| No. | Aspek Penilaian | Skor Maks. | Skor Perolehan | Keterangan |
|------------|--|------------|----------------|------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| I | Perencanaan | | | |
| | 1.1.Persiapan alat dan bahan | 2 | | |
| | 1.2.Analisis model susunan | 3 | | |
| | Sub total | 5 | | |
| II | Model Susunan | | | |
| | 2.1.penyiapan model susunan | 3 | | |
| | 2.2.Penentuan data instruksi pd model | 2 | | |
| | Sub total | 5 | | |
| III | Proses (Sistematika & Cara kerja) | | | |
| | 3.1.Prosedur pengambilan data | 10 | | |
| | 3.2.Cara mengukur variabel bebas | 8 | | |
| | 3.3.Cara menyusun tabel pengamatan | 10 | | |
| | 3.4.Cara melakukan perhitungan data | 7 | | |
| | Sub total | 35 | | |
| IV | Kualitas Produk Kerja | | | |
| | 4.1.Hasil perhitungan data | 5 | | |
| | 4.2.Hasil grafik dari data perhitungan | 10 | | |
| | 4.3.Hasil analisis | 10 | | |
| | 4.4.Hasil menyimpulkan | 10 | | |
| | Sub total | 35 | | |
| V | Sikap/Etos Kerja | | | |
| | 5.1.Tanggung jawab | 3 | | |
| | 5.2.Ketelitian | 2 | | |
| | 5.3.Inisiatif | 3 | | |
| | 5.4.Kemadirian | 2 | | |
| | Sub total | 10 | | |
| VI | Laporan | | | |
| | 6.1.Sistematika penyusunan laporan | 6 | | |
| | 6.2.Kelengkapan bukti fisik | 4 | | |
| | Sub total | 10 | | |
| | Total | 100 | | |

KRITERIA PENILAIAN

| No. | Aspek Penilaian | Kriteria penilaian | Skor |
|------------|--|--|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| I | Perencanaan | | |
| | 1.1.Persiapan alat dan bahan | ? Alat dan bahan disiapkan sesuai kebutuhan | 2 |
| | 1.2.Analisis model susunan | ? Merencanakan menyusun model | 3 |
| II | Model Susunan | | |
| | 2.1.Penyiapan model susunan | ? Model disiapkan sesuai dengan ketentuan | 3 |
| | 2.2.Penentuan data instruksi pada model | ? Model susunan dilengkapi dengan instruksi penyusunan | 2 |
| III | Proses (Sistematika & Cara kerja) | | |
| | 3.1.Prosedur pengambilan data | ? Dimensi bahan semikonduktor (A, dan I), mengukur tegangan Hall, arus I, kuat medan magnet B. | 10 |
| | 3.2.Cara mengukur variabel bebas | ? Tegangan V, dan medan magnet B dan medan listrik E. | 8 |
| | 3.3.Cara menyusun tabel pengamatan | ? Melengkapi data pengamatan dan pengukuran dalam tabel | 10 |
| | 3.4.Cara melakukan perhitungan data | ? Langkah menghitung koefisien Hall, konsentrasi pembawa (n atau p) | 7 |
| IV | Kualitas Produk Kerja | | |
| | 4.1.Hasil perhitungan data | ? Perhitungan dilakukan dengan cermat sesuai prosedur | 5 |
| | 4.2.Hasil grafik dari data perhitungan | ? Pemuatan skala dalam grafik dilakukan dengan benar | 5 |
| | 4.3.Hasil analisis | ? Analisis perhitungan langsung dengan metode grafik sesuai/saling mendukung | 10 |
| | 4.4.Hasil menyimpulkan | ? Kesimpulan sesuai dengan konsep teori | 10 |
| | 4.5. Ketepatan waktu | ? Pekerjaan diselesaikan tepat waktu | 5 |

| | | | |
|-----------|------------------------------------|---|---|
| V | Sikap/Etos Kerja | | |
| | 5.1.Tanggung jawab | ? Membereskan kembali alat dan bahan setelah digunakan | 3 |
| | 5.2.Ketelitian | ? Tidak banyak melakukan kesalahan | 2 |
| | 5.3.Inisiatif | ? Memiliki inisiatif bekerja yang baik | 3 |
| | 5.4.Kemandirian | ? Bekerja tidak banyak diperintah | 2 |
| VI | Laporan | | |
| | 6.1.Sistematika penyusunan laporan | ? Laporan disusun sesuai dengan sistematika yang telah ditentukan | 6 |
| | 6.2.Kelengkapan bukti fisik | ? Melampirkan bukti fisik | 4 |

BAB IV. PENUTUP

Setelah menyelesaikan modul ini, anda berhak untuk mengikuti tes praktik untuk menguji kompetensi yang telah anda pelajari. Apabila anda dinyatakan memenuhi syarat kelulusan dari hasil evaluasi dalam modul ini, maka anda berhak untuk melanjutkan ke modul berikutnya, dengan topik sesuai dengan peta kedudukan modul.

Jika anda sudah merasa menguasai modul, mintalah guru/instruktur anda untuk melakukan uji kompetensi dengan sistem penilaian yang dilakukan oleh pihak dunia industri atau asosiasi profesi yang kompeten apabila anda telah menyelesaikan suatu kompetensi tertentu. Atau apabila anda telah menyelesaikan seluruh evaluasi yang disediakan dalam modul ini, maka hasil yang berupa nilai dari guru/instruktur atau berupa portofolio dapat dijadikan sebagai bahan verifikasi oleh pihak industri atau asosiasi profesi. Dan selanjutnya hasil tersebut dapat dijadikan sebagai penentu standar pemenuhan kompetensi tertentu dan apabila memenuhi syarat anda berhak mendapatkan sertifikat kompetensi yang dikeluarkan oleh industri atau asosiasi profesi.

DAFTAR PUSTAKA

- Sze,S.M, 1985. ***Semiconductor Devaies, Physics and Technology.***
John Willey & Sons.
- Takahashi,K & Konagai, M, 1986. ***Amorphous Silicon Solar Cells.***
North Oxford Academic.
- Singh,Jasprit, 1995. ***Semiconductor Optoelectronic physics and Technology,*** McGraw-Hill, Inc.
- Halliday dan Resnick, 1991. ***Fisika jilid 2 (Terjemahan),*** Jakarta.
Penerbit Erlangga.
- Bob Foster, 1997. ***Fisika SMU,*** Jakarta. Penerbit Erlangga.
- Gibbs, K, 1990. ***Advanced Physics,*** New York.Cambridge University
Press.
- Martin Kanginan, 2000. ***Fisika SMU,*** Jakarta. Penerbit Erlangga.
- Tim Dosen Fisika ITS, 2002. ***Fisika I,*** Surabaya. Penerbit ITS.