



KILAT

JURNAL KAJIAN ILMU DAN TEKNOLOGI

Rakhmadi Irfansyah Putra

PERANCANGAN APLIKASI PENGEMBALIAN BERKAS TERHAPUS PADA NTFS

Rizqia Cahyaningtyas
Awit Lela Sigi

PERANCANGAN APLIKASI PENGELOLAAN RUMAH TANGGA
LABORATORIUM KOMPUTER STT-PLN

Dian Hartanti

MODEL CLUSTERING MENGGUNAKAN ALGORITMA K-MEANS PADA DATA
KELUHAN PELANGGAN PT PLN (PERSERO)
(STUDI KASUS : PT PLN (PERSERO) DISTRIBUSI JAKARTA DAN TANGERANG)

Abdul Haris; Nina Nirmaya

APLIKASI KONVERSI AKSARA SUNDA KE BAHASA INDONESIA BERBASIS WEB
MENGGUNAKAN PHP MYSQL

Riki Ruli A. Siregar
Alwi Baraqbah

SISTEM KONTROL PADA PENGGUNAAN ENERGI LISTRIK BERBASIS ANDROID
STUDI KASUS : SEKOLAH MENENGAH PERTAMA NEGERI (SMPN) 7 PONTIANAK

Yessy Asri

ANALISA PERBANDINGAN KEPUTUSAN METODE KLASIFIKASI DECISION TREE
DAN NAÏVE BAYES DALAM PENENTUAN DIAGNOSA HIPERTENSI

Marliana Sari

PUSAT INFORMASI KEMAHASISWAAN DENGAN MENGGUNAKAN PHP, MYSQL
DAN METODE MVC

Inge Handriani

FLOWCHART SISTEM PENAGIHAN PADA PERUSAHAAN JASA KONSULTAN

Herman Bedi Agtriadi

RANCANG BANGUN SISTEM MONITORING PADA BANGUNAN PENGENDALI
SEDIMEN BERBASIS ANDROID DI PLTA

Indah Handayasari
Aziz Maulana

DESAIN ALTERNATIF JEMBATAN MENGGUNAKAN PLAT GIRDER
(STUDI KASUS JEMBATAN RSUD KOTA TANGERANG)

Irma Wirantina Kustanrika

PERHITUNGAN SINYAL PADA SIMPANG DENGAN METODE WEBSTER

Mukhlis Akhadi

MEMPRODUKSI BAHAN SEMIKONDUKTOR DI DALAM TERAS REAKTOR NUKLIR

ISSN 2089-1245



9 772089 124519

SEKOLAH TINGGI TEKNIK - PLN (STT-PLN)

KILAT

VOL.4

NO.1

HAL. 1 - 119

APRIL 2015

ISSN 2089 - 1245

MEMPRODUKSI BAHAN SEMIKONDUKTOR DI DALAM TERAS REAKTOR NUKLIR

Mukhlis Akhadi

Peneliti Utama di Badan Tenaga Nuklir Nasional
Jurusan Teknik Elektro Sekolah Tinggi Teknik-PLN

Abstrak

Perilaku dan keberadaan elektron bebas di alam telah menarik perhatian para ilmuwan. Penelitian untuk mengungkap sifat-sifat elektron dilakukan agar elektron itu dapat dimanfaatkan seoptimal mungkin untuk berbagai keperluan. Kemajuan dalam studi fisika zat padat telah mengantarkan para ilmuwan mempelajari secara mendalam tentang tingkah laku elektron dalam materi semikonduktor. Melalui pengembangan teknologi semikonduktor ini, aliran-aliran elektron dalam chip semikonduktor dapat dimanfaatkan untuk mengolah, menyimpan dan mengantarkan data serta informasi elektronis melalui sandi-sandi digital. Kemajuan perkembangan dunia elektronika dewasa ini tidak lepas dari kemajuan yang dicapai dalam studi mengenai bahan semikonduktor sebagai bahan baku utama komponen-komponen elektronika. Saat ini telah dikembangkan suatu metode untuk memproduksi bahan semikonduktor dengan teknik nuklir. Makalah ini akan membahas teknik produksi bahan semikonduktor dengan metode irradiasi neutron di dalam teras reaktor nuklir. Proses pembuatan bahan semikonduktor dengan teknik irradiasi neutron dapat dilakukan dengan hasil yang sangat baik. Kadar dopan dalam suatu bahan semikonduktor dapat diatur dengan tingkat ketelitian sangat tinggi melalui teknik pengaturan waktu irradiasi yang tepat.

Kata Kunci: elektron bebas, semikonduktor, pencangkakan ion, reaktor nuklir, berkas neutron

Abstract

Behaviour and existing of free electron has attract the attention for the scientist. Researches for studying characteristic of free electron have been carried out in order to utilize such electron in several purposes in the life. Development in solid states physics has lead to good understanding of free electron behaviour in state materials. Solid-state physics forms the theoretical basis of materials science. It also has direct applications, for example in the technology of transistors and semiconductors. Throughout the development technology of semiconductor, electron current in semiconductor chips can be utilized for several purposes due to digital codes. Solid-state electronics are those circuits or devices built entirely from solid materials and in which the electrons, or other charge carriers, are confined entirely within the solid material. Recently has been developed a kind of method to produce semiconductor material using nuclear technology. This paper will describe the technology of producing semiconductor material using neutron beam irradiation in a nuclear reactor core. Nuclear technology with neutron beam irradiation can produce very good in quality due to its high impurity of semiconductor material.

Key Words: free electron, semiconductor, ion doping, nuclear reactor, neutron beams

1. Pendahuluan

Sekitar tahun 1920-an, lahir konsep baru di beberapa pusat penelitian fisika di Heidelberg, Göttingen, dan Kopenhagen. Konsep baru tersebut ditandai dengan lahirnya bidang kajian kuantum mekanika atau kuantum fisika yang semula dipelopori oleh Max Planck dan Albert Einstein, kemudian dilanjutkan oleh ilmuwan seperti Niels Bohr, Schrödinger, Max Born, Samuel A. Goudsmith, Heisenberg dan lain-lain. Konsep ini secara fundamental telah mengubah prinsip kontinuitas energi menjadi konsep diskrit sehingga mengubah pemahaman para ilmuwan yang sudah berjalan lebih dari satu abad.

Kemajuan riset dalam bidang fisika telah mengantarkan para fisikawan dapat meneliti dan mempelajari berbagai sifat kelistrikan zat padat. Semula para ilmuwan hanya mengenal adanya dua

kelompok bahan yang terkait dengan perilaku elektron bebas, yaitu isolator (bahan yang tidak dapat menghantarkan arus listrik) dan konduktor (bahan yang sangat baik dalam menghantarkan arus listrik). Namun dari studi fisika zat padat akhirnya para ilmuwan berhasil mengenali karakteristik bahan dengan sifat kelistrikannya berada di antara isolator dan konduktor, yang selanjutnya dikenal sebagai bahan semikonduktor.

Penemuan bahan semikonduktor kemudian disusul dengan penemuan komponen elektronik yang disebut transistor. Dalam perjalanan berikutnya, transistor tidak hanya mengubah secara mencolok berbagai aspek kehidupan moderen, tetapi transistor tergolong salah satu dari beberapa penemuan modern yang memajukan teknologi dengan biaya rendah. Transistor dapat dihubungkan pada rangkaian elektronik sebagai komponen terpisah atau dalam bentuk terpadu pada suatu chip.

Pada tahun 1958, insinyur di dua perusahaan elektronik, Kilby (Texas Instrument) dan Robert Noyce (Fairchild) telah memperkenalkan ide rangkaian terpadu monolitik yang dikenal dengan nama IC (*integrated circuit*). Kemajuan dalam bidang mikroelektronika ini tidak terlepas dari penemuan bahan semikonduktor maupun transistor. Komputer digital berkecepatan tinggi bisa terwujud berkat penggunaan transistor dalam IC yang merupakan kumpulan jutaan transistor renik yang menempati ruangan sangat kecil, yang semula hanya bisa ditempati oleh sebuah transistor saja.

Pada tahun 1960, produk elektronik masih didominasi oleh radio, tape dan televisi yang telah menggunakan transistor. Pada saat itulah Kilby sedang mengembangkan IC. Tidak lama kemudian, IC rancangan Kilby menggeser penggunaan transistor dan menjadi komponen utama dalam komputer. Inilah komputer generasi ketiga yang diperkenalkan antara tahun 1963 sampai dengan tahun 1971. Ciri dari komputer generasi ini adalah : menggunakan *Monolithic Integrated Circuit* (MIC) dan *Large Scale Integration* (LSI), mempunyai memori lebih besar, bekerjanya lebih cepat, serta ukuran fisiknya lebih kecil dibandingkan generasi sebelumnya. Masuk dalam generasi ini adalah IBM 390.

Penyempurnaan teknologi IC terus berlanjut. Ide yang semula terlahir dari pemikiran Kilby itu dalam kurun waktu berikutnya terus mengalami penyempurnaan melalui kerja keras ribuan insinyur terbaik dunia, dan hadirlah teknologi chip seperti yang kita saksikan saat ini. Dampak dari perkembangan tersebut adalah hadirnya komputer-komputer dalam bentuk yang lebih cerdas, bekerja lebih cepat dan handal, mempunyai kapasitas memori yang sangat besar serta keunggulan-keunggulan lainnya, meski bentuk maupun volumenya justru semakin kecil. Inilah komputer generasi keempat yang diperkenalkan antara tahun 1971 sampai dengan sekarang. Di dalam komputer ini telah menggunakan *Metal Oxide Semiconductor* (MOS). Masuk dalam kelompok ini adalah komputer-komputer produksi BMC, IBM dan Apple yang kini beredar di pasaran.

Berbagai produk monumental dari perkembangan teknologi elektronika hadir di sekeliling kita. Namun teknologi mikroelektronika bukan sekedar menghadirkan produk, tetapi juga menampilkan produk itu dalam bentuk dan ukuran yang makin lama makin kecil dengan kemampuan kerja yang lebih tinggi. Dapat kita sebut disini sebagai contoh adalah munculnya komputer dan telepon seluler (ponsel). Luasnya penggunaan komputer, serta hadirnya berbagai jenis produk telekomunikasi dan barang elektronik lainnya bermula dari hasil jerih payah penelitian yang dilakukan para fisikawan, terutama mereka yang terlibat langsung dalam penelitian dan pengembangan teknologi semikonduktor. Melalui teknologi inilah aliran-aliran elektron dalam chip semikonduktor dapat dimanfaatkan untuk mengolah, menyimpan dan mengantarkan data serta informasi melalui sandi-sandi digital.

Komputer yang semula dirancang untuk menghitung dan menulis, dalam perkembangan berikutnya ternyata dapat menembus berbagai aspek kehidupan manusia, serta dapat digunakan untuk berbagai keperluan. Hampir semua informasi dapat

ditangani dan diproses dengan berbagai cara oleh komputer. Hal ini karena komputer mampu "mengkode" berbagai macam bentuk data ke dalam bentuk digital biner (1 dan 0 atau on dan off). Banyak penggunaan komputer saat ini jauh dari kegiatan hitung-menghitung sebagaimana komputer pertama kali dibuat.

Dalam penelitian dasar, banyak perhitungan detail dalam fisika yang terlalu rumit untuk dipecahkan. Untuk mengatasi masalah ini, para fisikawan mulai melirik pada simulasi super komputer. Para ahli fisika yang menaruh minat pada kromodinamika kuantum sejak permulaan tahun 1980-an mulai mendisain super komputer paralel untuk menyelesaikan berbagai perhitungan fisika secara cepat. Komputer paralel yang dikembangkan para peneliti serta industri memiliki banyak sekali prosesor sehingga dapat bekerja serentak menyelesaikan perhitungan yang sangat rumit. Dengan komputer ini para peneliti mampu menyelesaikan 6,5 milyar perhitungan per detik atau berkekuatan 6,5 gigaflop.

Para seniman atau designer dapat memanfaatkan komputer karena gambar dapat diubah atau disajikan dalam bentuk digit. Para arsitek dan perancang kota secara luas memanfaatkan kemampuan komputer untuk menggambar dalam bentuk tiga dimensi yang dapat ditampilkan dan dilihat dari berbagai arah. Para musisi juga telah mendapatkan cara dalam memanfaatkan komputer, baik untuk menulis, merekam maupun memainkan musik yang telah dikode secara digit. Semua informasi baik musik (suara) maupun gambar dapat direkam atau disimpan di dalam disk yang dapat dibaca ulang secara optis oleh laser.

Hampir semua alat maupun perkakas sedikit atau banyak bertumpu pada teknologi elektronika. Oleh sebab itu, hampir semua aspek kehidupan manusia dipengaruhi oleh penggunaan bahan semikonduktor dalam produk-produk elektronik. Penggunaan semikonduktor dalam berbagai peralatan elektronik akan meningkat seiring dengan semakin canggihnya produk elektronik. Semikonduktor diperkirakan paling banyak dipakai oleh industri komputer (57 %), peralatan komunikasi (17 %), peralatan elektronik rumah tangga (15 %) dan sisanya sekitar 11 % untuk keperluan lainnya, seperti peralatan militer, otomotif dan mesin industri.

2. Landasan Teori

2.1 Teori Pita Energi

Elektron dalam keadaan terikat dalam suatu atom memang sudah dikenal sejak akhir abad ke-18. Percobaan tentang sinar katoda yang dilakukan oleh J.J. Thomson pada tahun 1897 berhasil memisahkan partikel bermuatan listrik negatif dari ikatan atom. Pemisahan yang dilakukan menggunakan medan listrik dan medan magnet itu kemudian mengubah pandangan ilmuwan tentang atom. Semula Thomson menyebut partikel temuannya itu dengan istilah zarah, dan kini partikel itu dikenal dengan nama elektron.

Sebelum tahun 1902, Thomson telah membuktikan bahwa elektron merupakan komponen dasar dan universal dari semua jenis materi. Sudah ribuan, bahkan mungkin jutaan, eksperimen fisika dan

kimia yang hingga kini telah dilakukan. Meskipun begitu, belum ada satupun eksperimen yang memberikan sinyal bahwa elektron bias dipecah menjadi partikel yang lebih kecil lagi. Elektron selama ini dianggap sebagai elemen penyusun atom yang tidak dapat dipecah-pecah lagi.

Ketika pertama kali ditemukan, Thomson dan para ilmuwan lain sezamannya tentu tidak membayangkan, kalau elektron itu di kelak kemudian hari bakal berperan sebagai komponen utama dalam proses-proses yang berkaitan dengan arus listrik dalam dunia elektronika. Kala itu, elektron dalam suatu atom memang sudah dipakai sebagai dasar untuk menerangkan kaidah-kaidah yang menjadi hukum dasar dalam reaksi kimia, yang notabene berdasarkan interaksi antar elektron dari atom-atom yang melakukan reaksi. Keberadaan elektron juga telah mengantarkan para ilmuwan ke arah pengenalan materi secara lebih sempurna. Tak lama setelah penemuan elektron, Ernest Rutherford dan Niels Bohr menyusun teori atom yang menggambarkan bahwa atom terdiri atas inti atom bermuatan positif yang dikelilingi oleh elektron-elektron bermuatan negatif.

Selain terikat di dalam suatu atom, elektron juga dapat berada dalam keadaan bebas. Elektron-elektron bebas ini memainkan peran yang sangat vital dalam bidang kelistrikan. Arus listrik yang besar sekali manfaatnya dalam setiap sektor kehidupan moderen saat ini, tidak lain karena adanya elektron yang mengalir dari suatu tempat ke tempat lain melalui bahan penghantar. Elektron bebas ini ternyata masih menyimpan berbagai misteri yang belum sepenuhnya diketahui oleh umat manusia. Meski sudah ribuan kali penelitian dilakukan, namun belum ada satupun penelitian yang mampu mengungkap misteri elektron bebas secara eksak, sehingga perilaku dan keberadaannya di alam masih tetap menarik perhatian para ilmuwan. Sampai saat ini, penelitian terhadap perilaku elektron itu masih terus dilakukan.

Perilaku elektron umumnya dipelajari melalui dua pendekatan, yaitu pendekatan model energi dan pendekatan model ikatan. Pada pendekatan model pertama, ada konsep yang dikenal dengan sebutan prinsip larangan Pauli (*Pauli exclusion principle*) yang menyatakan bahwa pada suatu tingkat energi pada kulit atom, hanya ada dua elektron dimana satu buah elektron sedang spin-up dan satunya lagi sedang *spin-down*. Pada pendekatan model kedua, sifat elektron dikenali melalui reaksi kimia yang membentuk jenis-jenis ikatan yang berbeda antara satu unsur dengan unsur lainnya.

Karena kecilnya ukuran elektron, maka pengamatan perilakunya dilakukan dengan pendekatan fungsi distribusi. Ada tiga fungsi distribusi yang umumnya digunakan untuk menjelaskan perilaku elektron. Pertama adalah statistik Maxwell-Boltzmann (*Maxwell-Boltzmann statistics*) yang mendasarkan pada asumsi bahwa sebuah elektron dapat dikenali tetapi tidak mengikuti prinsip larangan Pauli (*Pauli exclusion principle*). Kedua adalah fungsi statistik Fermi-Dirac (*Fermi-Dirac statistics*) yang mendasarkan pada asumsi bahwa sebuah elektron tidak dapat dikenali tetapi mengikuti prinsip larangan Pauli. Ketiga adalah fungsi distribusi Bose-Einstein (*Bose-Einstein distribution*) yang mendasarkan pada

asumsi bahwa sebuah elektron tidak dapat dikenali dan tidak mengikuti prinsip larangan Pauli.

Tujuan utama dari para peneliti untuk mengungkap sifat-sifat elektron adalah agar mereka dapat memanfaatkan seoptimal mungkin keberadaan elektron-elektron bebas untuk berbagai keperluan. Elektron dalam jumlah berorde jutaan dapat mewakili berbagai besaran, seperti menghasilkan suara dalam sistem audio (radio, tape), menghasilkan suara dan gambar dalam sistem audio-visual (TV, VCD), membawa dan menyimpan data-data digital dalam sistem komputer, dan sebagainya.

Perilaku elektron bebas di dalam bahan serta sifat-sifat kelistrikan bahan dapat diterangkan dengan baik menggunakan teori pita energi yang terdiri atas pita valensi dan pita konduksi. Elektron-elektron bergerak mengelilingi inti pada lintasan-lintasan dengan tingkat energi tertentu. Penelitian menggunakan medan listrik yang ditimbulkan oleh inti atom zat padat dapat digunakan untuk mempelajari tingkatan-tingkatan energi elektron dalam atom. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa tingkat-tingkat energi elektron itu berkelompok-kelompok. Karena letak tingkatan energi antar kelompok itu sangat berdekatan, maka kelompok itu dinamakan pita energi. Sedang daerah-daerah yang tidak memiliki tingkatan energi disebut celah energi.

Sesuai dengan prinsip larangan Pauli, maka tiap-tiap tingkatan energi hanya dapat ditempati oleh dua buah elektron. Jika N menunjukkan jumlah atom dalam zat padat, maka setiap pita energi pada tingkatan-tingkatan tersebut hanya dapat diisi oleh $2N$ elektron. Pita terakhir yang terisi penuh dengan elektron dinamakan pita valensi, sedang pita di atasnya yang memiliki energi lebih tinggi disebut pita konduksi. Pita konduksi ini bisa terisi elektron tetapi tidak sampai penuh atau kosong sama sekali.

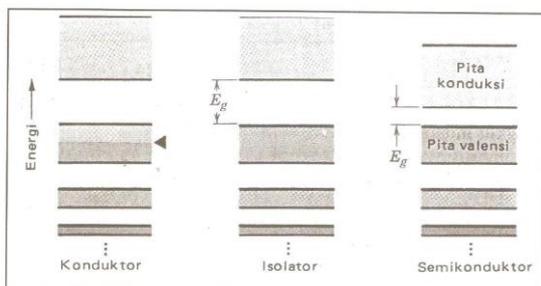
Jika suatu pita energi terisi penuh oleh elektron, maka elektron-elektron di dalam pita itu bersifat tidak lincah. Sedang pita energi yang hanya terisi setengah dari jumlah elektron yang diperkenankan, maka elektron-elektron dalam pita tersebut bersifat lincah. Elektron yang dapat bergerak lincah ini dapat berfungsi sebagai penghantar listrik yang baik. Sebagai contoh dalam hal ini adalah logam natrium (Na) yang memiliki 11 elektron pada kulit atomnya. Jika jumlah atom Na adalah N buah, maka logam Na memiliki $11N$ buah elektron. Pada pita terendah logam Na terisi $2N$ elektron, pita berikutnya terisi $2N$ elektron dan seterusnya, sehingga pita energi terakhir (pita ke-6) hanya terisi N elektron dari $2N$ elektron yang diperkenankan. Pita ke-5 dari atom Na disebut pita valensi, sedang pita ke-6 disebut pita konduksi. Elektron-elektron pada pita ke-6 ini dapat bergerak lincah dan dapat berfungsi sebagai penghantar (konduktor) listrik yang baik.

Bahan-bahan yang pita konduksinya berisi elektron setengah bagian bersifat sebagai penghantar listrik yang baik. Sedang jika pita konduksinya kosong akan bersifat sebagai penahan listrik (isolator). Agar elektron dapat bergerak lincah, maka harus ada perpindahan elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Untuk perpindahan ini diperlukan energi sekurang-kurangnya sama dengan celah energi yang ada di atasnya. Bahan yang elektron-elektronnya bisa melakukan perpindahan semacam ini disebut bahan

semikonduktor yang memiliki sifat hantaran listrik di antara isolator dan konduktor. Kita dapat membedakan antara bahan semikonduktor dan isolator berdasarkan pada ukuran lebar celah energi antar pita seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pada bahan isolator, celah energi antara pita valensi dan pita konduksi sangat lebar, nilainya kira-kira 5 eV atau lebih. Sedangkan pada bahan semikonduktor celah tersebut cukup sempit, nilainya kira-kira 1 eV, sehingga elektron-elektron dari pita valensi dapat dengan mudah meloncat ke pita konduksi.

Sebagai contoh bahan semikonduktor adalah kristal silikon (Si) dan germanium (Ge). Kristal Si memiliki 14 elektron pada kulit atomnya. Pada suhu 0 K, elektron-elektron itu mengisi pita energi pertama sampai ke-7 hingga penuh, masing-masing dengan 2N elektron. Sedangkan pita ke-8 dan seterusnya kosong. Hal ini berarti bahwa kristal Si pada suhu 0 K bersifat sebagai isolator karena pita konduksi (pita ke-8) kosong. Namun karena celah energi antara pita valensi dan pita konduksi tidak terlalu lebar, maka pada suhu kamar ada cukup banyak elektron yang meninggalkan pita valensi loncat ke pita konduksi.

Energi termik yang tersedia pada temperatur ruang seringkali mencukupi untuk menaikkan elektron melewati celah. Tentu saja jumlah elektron pada pita konduksi bahan semikonduktor tidak sebanyak pada bahan konduktor, sehingga hambatan jenisnya masih jauh lebih tinggi dibandingkan bahan konduktor. Sebagai akibat dari perpindahan elektron ini, Si dapat berperan sebagai penghantar listrik pada suhu kamar, meskipun daya hantarnya tidak sebaik bahan konduktor.



Gambar 1 : pita dan celah energi pada bahan konduktor, isolator dan semikonduktor

Pada bahan isolator, elektron yang terikat inti atom pada tingkat pita valensi sangat sulit untuk berpindah ke tingkat energi yang lebih atas yang disebut energi konduksi. Kesulitan ini disebabkan oleh besarnya celah energi antara pita valensi dan pita konduksi. Sementara itu, pada bahan konduktor, kedua tingkat energi tadi saling berhimpitan, sehingga sebagian elektron dapat bergerak bebas. Pada bahan semikonduktor, celah energi antara pita valensi dan pita konduksi sangat kecil sehingga elektron pada tingkat energi valensi dengan mudah dapat berpindah ke tingkat energi konduksi.

Bahan semikonduktor memiliki sifat hantaran listrik yang khusus, sangat berlainan dengan bahan konduktor. Apabila logam-logam konduktor

dipanaskan, maka hambatan jenisnya bertambah secara linier dengan koefisien suhunya sangat kecil. Untuk menaikkan hambatan jenis bahan konduktor menjadi dua kali lipat dari semula diperlukan kenaikan suhu lebih dari 200°C. Sebaliknya, jika bahan semikonduktor dipanaskan, hambatan jenisnya akan berkurang. Hal ini disebabkan elektron-elektron pada pita valensi mendapatkan energi termik yang cukup untuk meloncat ke pita konduksi, sehingga daya hantar listriknya bertambah.

Semakin tinggi temperatur akan semakin banyak elektron yang mendapatkan energi termik sehingga semakin banyak pula elektron-elektron yang loncat ke pita konduksi. Dalam pita konduksi ini elektron bergerak lincah sehingga dapat bertindak sebagai penghantar listrik yang baik. Oleh sebab itu, hambatan jenis bahan semikonduktor turun dengan cepat apabila terjadi kenaikan suhu. Pada daerah suhu tertentu, hanya diperlukan suhu beberapa derajat saja untuk menurunkan hambatan jenisnya menjadi setengah dari semula.

2.2 Bahan Semikonduktor

Revolusi dalam dunia elektronika yang melahirkan teknologi mikroelektronika dipicu oleh kemajuan dalam studi fisika zat padat yang dirintis oleh F. Seitz dan fisika semikonduktor oleh J. Bardeen dan William B. Shockley di Amerika Serikat serta Love di Rusia pada tahun 1940-an. Kemajuan riset dasar fisika tadi telah mengantarkan tiga ilmuwan dari AS, yaitu W.B. Shockley, W.H. Brattain dan J. Bardeen menemukan transistor sekaligus memenangkan hadiah nobel bidang fisika pada tahun 1956. Mereka bertiga dinilai berjasa dalam mempelajari secara mendalam tentang tingkah laku elektron dalam materi semikonduktor.

Melalui pengembangan teknologi semikonduktor ini, aliran-aliran elektron dalam chip semikonduktor dapat dimanfaatkan untuk mengolah, menyimpan dan mengantarkan data serta informasi elektronis melalui sandi-sandi digital. Kemajuan perkembangan dunia elektronika dewasa ini tidak lepas dari kemajuan yang dicapai dalam studi mengenai bahan semikonduktor sebagai bahan baku utama komponen-komponen elektronika.

Bahan semikonduktor yang sering dimanfaatkan untuk kegiatan cangkuk-mencangkuk ini adalah germanium (Ge), Silikon (Si), Tellurium (Te) dan indium antimonide. Sedangkan sebagai bahan dopannya adalah boron (B), fosfor (P), arsenik (As) dan aluminium (Al). Bahan utama semikonduktor yang selama ini dimanfaatkan terutama adalah Si dan Ge, yaitu unsur-unsur kimia yang terdapat pada golongan IVA susunan berkala unsur kimia. Kedua bahan itu kini dapat memenuhi seluruh kebutuhan industri komponen elektronika berbasis bahan semikonduktor. Silikon merupakan unsur kimia bukan logam dengan nomor atom 14 dan massa atomnya 28,1. Ditemukan pada tahun 1824 oleh J. Berzelius. Silikon merupakan unsure terbanyak dalam kerang bumi dengan jumlah mencapai lebih dari 25 % berat bumi. Silika (silicon dioksida) merupakan bentuk yang terbanyak terdapat di alam. Unsur ini tersebar banyak sekali dalam susunan batuan dan mineral.

Germanium merupakan unsur kimia bersifat setengah logam dengan nomor atom 32 dan nomor massanya 72,59. Ditemukan pertama kali pada tahun 1886 oleh C. Winkler. Pada umumnya terdapat dalam kerak bumi dan laut dalam jumlah sedikit. Tidak terdapat secara bebas di alam. Terdapat dalam berbagai jenis mineral maupun bijih logam lainnya, dalam debu batubara tertentu serta pada pipa pembuangan debu dalam proses pendinginan. Dalam industri elektronika, unsur ini terutama digunakan untuk pembuatan transistor dan komponen elektronika lainnya, detector infra merah, spektroskop, lensa dan fosfor untuk lampu.

Dalam pita valensi, elektron sebetulnya berpasangan dengan lubang (*hole*). Karena elektron bermuatan negatif dan lubang bermuatan positif, maka secara keseluruhan pasangan elektron-lubang adalah netral. Jika elektron loncat dari pita valensi menuju pita konduksi, maka akan terbentuk lubang pada pita valensi yang ditinggalkan oleh elektron. Lubang itu bermuatan positif dan dapat bergerak lincah di dalam pita valensi. Hasil percobaan menunjukkan bahwa penghantar arus listrik pada bahan semikonduktor bukan hanya dilakukan oleh elektron pada pita konduksi saja, tetapi juga oleh lubang yang bergerak di dalam pita valensi. Bahan semikonduktor yang masih murni atau belum disisipi atom-atom lain seperti ini disebut semikonduktor intrinsik.

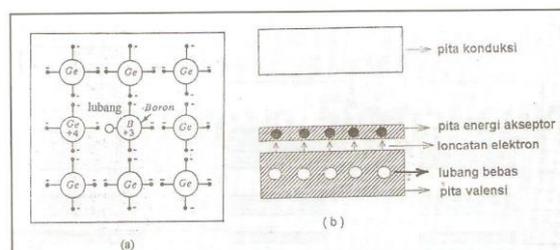
Selain melalui pemanasan, hambatan jenis pada bahan semikonduktor dapat juga diturunkan dengan mencangkokkan sedikit pengotor ke dalam bahan tersebut. Istilah cangkok-mencangkok dalam disiplin fisika zat padat berkaitan dengan upaya memperbaiki sifat elektrik suatu bahan. Usaha ini biasanya ditempuh dengan cara mencangkokkan ion ke dalam suatu bahan, sehingga bahan yang tadinya murni menjadi terkotori dengan masuknya ion tadi. Ketidakmurnian bahan ini ternyata dapat menimbulkan perubahan sifat elektrik bahan, sehingga dapat dimanfaatkan untuk maksud-maksud tertentu. Ion yang dicangkokkan itu disebut dopan, sedang proses pencangkokannya disebut doping.

Kita dapat menambahkan atom-atom pengotor ke dalam bahan semikonduktor untuk mendapatkan efek-efek tertentu sesuai dengan yang diharapkan. Dalam bidang elektronika zat padat, pencangkokan ion dilakukan terhadap bahan semikonduktor untuk meningkatkan daya hantar listriknya. Bahan semikonduktor yang sudah dicangkoki sedikit pengotor ini disebut semikonduktor ekstrinsik. Untuk mendapatkan perubahan sifat elektrik terhadap bahan semikonduktor, cukup dicangkokkan satu ion dopan per satu juta atom semikonduktor. Dengan perbandingan seperti itu, dalam bahan semikonduktor sudah terbentuk beberapa tingkat energi diskrit yang cukup untuk mempermudah loncatan elektron. Pencangkokan pengotor sebanyak 0,005% saja sudah dapat menghasilkan cukup banyak elektron bebas.

Jenis atom pengotor yang dicangkokkan ke dalam semikonduktor ada dua jenis, yaitu atom pengotor yang memiliki kekurangan elektron (disebut atom akseptor) dan atom pengotor yang memiliki kelebihan elektron (disebut atom donor). Oleh sebab itu, ada dua jenis semikonduktor ekstrinsik karena perbedaan jenis atom pengotor yang dicangkokkan ke

dalamnya, yaitu semikonduktor tipe-p (positif) dan semikonduktor tipe-n (negatif).

Semikonduktor tipe-p adalah semikonduktor yang dicangkoki atom akseptor yang kekurangan elektron. Semikonduktor ini dibuat dari atom yang memiliki empat elektron pada orbit terluarnya, dicangkoki atom pengotor yang memiliki tiga elektron pada orbit terluarnya. Misal atom germanium (Ge) yang memiliki empat elektron pada orbit terluarnya dicangkoki dengan boron (B) atau aluminium (Al) yang memiliki tiga elektron pada orbit terluarnya. Tiga elektron dari atom B atau Al melakukan ikatan kovalen dengan elektron-elektron valensi atom Ge, namun ada satu elektron dari atom Ge yang tidak mendapatkan pasangan sehingga menimbulkan lubang seperti ditunjukkan pada Gambar 2(a). Dengan pencangkokan itu, berarti kita telah menambahkan satu lubang untuk setiap atom pengotor B atau Al ke dalam bahan semikonduktor Ge.



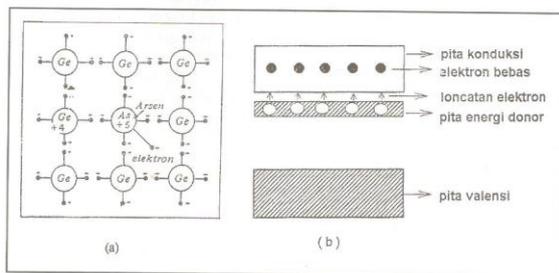
Gambar 2 : Proses terbentuknya lubang sebagai pembawa aliran listrik Pada semikonduktor tipe-p

Energi celah antara pita valensi dan pita konduksi untuk atom Ge adalah 0,67 elektron Volt (eV). Pencangkokan atom B pada kristal Ge memungkinkan diturunkannya hambatan jenis atom Ge karena munculnya pita energi di dalam celah energi yang letaknya sedikit di atas pita valensi seperti ditunjukkan pada Gambar 2(b). Pita energi ini berisi lubang-lubang yang dapat menerima elektron sehingga disebut pita energi akseptor. Elektron-elektron dalam pita valensi lebih mudah loncat ke pita energi akseptor sehingga meninggalkan lubang-lubang pada pita valensi. Lubang yang terbentuk akibat loncatan elektron meninggalkan pita valensi ini dapat bertindak sebagai pembawa aliran listrik. Karena pembawa aliran listriknya bermuatan positif, maka bahannya disebut semikonduktor tipe-p.

Semikonduktor tipe-n adalah semikonduktor yang dicangkoki atom donor yang kelebihan elektron. Semikonduktor ini dibuat dari atom yang memiliki empat elektron pada orbit terluarnya, dicangkoki atom pengotor yang memiliki lima elektron pada orbit terluarnya. Misal atom germanium (Ge) yang memiliki empat elektron pada orbit terluarnya dicangkoki dengan arsen (As) atau fosfor (P) yang memiliki lima elektron pada orbit terluarnya. Empat elektron dari atom As atau P melakukan ikatan kovalen dengan elektron-elektron valensi atom Ge, namun ada satu elektron dari atom As yang tidak mendapatkan pasangan sehingga bersifat sebagai elektron bebas seperti ditunjukkan pada Gambar 3 (a). Dengan pencangkokan itu, berarti kita telah menambahkan

satu elektron untuk setiap atom pengotor As atau P ke dalam bahan semikonduktor Ge.

Pencangkakan atom As pada kristal Ge memungkinkan diturnkannya hambatan jenis atom Ge karena munculnya pita energi di dalam celah energi yang letaknya sedikit di bawah pita konduksi seperti ditunjukkan pada Gambar 3 (b). Pita energi ini berisi elektron-elektron bebas sehingga disebut pita energi donor. Beda energi antara pita energi donor dan pita konduksi ini sangat kecil, kira-kira hanya 0,05 eV. Sedang pencangkakan atom donor phosphor (P) ke dalam silikon dapat menurunkan energi pemisah pita hingga mencapai 0,045 eV. Oleh sebab itu, elektron-elektron dalam pita energi donor lebih mudah loncat ke pita valensi dan dapat bertindak sebagai pembawa aliran listrik. Karena pembawa aliran listriknya bermuatan negatif, maka bahannya disebut semikonduktor tipe-n.



Gambar 3 : Proses terbentuknya elektron bebas sebagai pembawa aliran listrik Pada semikonduktor tipe-n

3. Hasil dan Analisis

3.1 Teknik Pencangkakan

Teknik pencangkakan ion ke dalam bahan semikonduktor dapat dilakukan dengan beberapa cara. Teknik konvensional yang sering dipakai adalah dengan metode difusi. Dalam teknik ini, bahan semikonduktor dan pengotor dicampur sedemikian rupa sehingga ion-ion dopan berdifusi ke dalam bahan semikonduktor. Namun teknik ini ternyata memiliki kelemahan, yaitu dapat masuknya pengotor lain yang sebenarnya tidak dikehendaki. Dalam prakteknya, terlalu sulit untuk mendapatkan bahan dopan dengan tingkat kemurnian tinggi. Mengingat sifat elektrik bahan semikonduktor yang sangat sensitif terhadap pengotor, maka kehadiran pengotor yang tidak dikehendaki ini akan menimbulkan masalah tersendiri terhadap unjuk kerja piranti semikonduktor yang dihasilkan dari proses difusi.

Pencangkakan ion dengan teknik nuklir ternyata mampu mengatasi masalah ketidakmurnian bahan dopan. Pencangkakan dopan dengan teknik nuklir dilakukan menggunakan alat pemercepat partikel (akselerator). Dalam proses ini, dopan dalam bentuk ion bermuatan dipercepat di dalam akselerator kemudian ditabrakkan ke sasaran berupa bahan semikonduktor yang akan dicangkaki. Ion dopan yang sudah dipercepat dengan akselerator akan memiliki energi kinetik tertentu yang cukup untuk masuk ke dalam bahan semikonduktor dan menggeram di dalamnya. Teknik ini dapat mempertahankan tingkat kemurnian bahan dopan, serta dapat menghindari

kemungkinan masuknya pengotor lain yang tidak dikehendaki. Proses pencangkakan dengan akselerator ini dikembangkan terutama untuk mendukung industri komponen-komponen elektronika seperti transistor, dioda zener, integrated circuit, sel surya serta berbagai jenis detektor.

Selain dengan akselerator, teknik nuklir lainnya yang saat ini juga sering dimanfaatkan untuk pembuatan bahan semikonduktor adalah teknik irradiasi neutron. Pembuatan bahan baru dengan struktur yang berbeda dari bahan aslinya dapat dilakukan dengan cara memasukkan partikel neutron ke dalam inti atom bahan. Karena penyerapan neutron itu, maka kestabilan inti atom bahan menjadi terganggu dan bahan akan berubah menjadi isotop lain dengan sifat fisika yang berbeda dari unsur aslinya. Teknik ini ternyata dapat dimanfaatkan untuk memproduksi bahan semikonduktor, terutama silikon yang dicangkaki phosphor (P) dengan kadar tertentu, sehingga berperan sebagai bahan semikonduktor yang sangat baik dengan tingkat kemurniannya yang sangat tinggi. Hingga saat ini, teknik irradiasi neutron dikenal sebagai teknik terbaik untuk proses pencangkakan dopan.

Ada tiga jenis reaktor nuklir dilihat dari tujuan penggunaannya. Pertama adalah reaktor yang digunakan untuk tujuan penelitian yang lazim disebut reaktor penelitian (*research reactor*). Kedua adalah reaktor yang dirancang untuk menghasilkan listrik yang lazim disebut reaktor daya (*power reactor*) dan digunakan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Ketiga adalah reaktor yang dirancang berperan ganda, yaitu sebagai penghasil listrik (berperan sebagai reaktor daya) dan produksi bahan bakar fisi (membiakkan bahan bakar nuklir) yang lazim dikenal sebagai reaktor pembiak (*breeder reactor*).

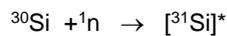
Reaktor penelitian mempunyai peran yang sangat besar dalam rangka pemanfaatan teknik nuklir di luar energi. Reaktor jenis ini hanya memanfaatkan neutron hasil reaksi fisi nuklir, sedang panas yang keluar dari reaksi nuklir itu akan dibuang. Karena memanfaatkan neutron, reaktor penelitian dirancang mempunyai fluks neutron yang cukup besar sehingga cocok sebagai sarana untuk melakukan irradiasi dengan neutron. Agar fluks neutronnya mencapai optimum, maka pada teras reaktor dikelilingi balok berillium (Be) dan beberapa baris elemen Be sebagai pemantul neutron. Selain itu, karena panasnya tidak dimanfaatkan, maka reaktor penelitian dirancang berdaya thermal rendah, yaitu berkisar dari beberapa ratus kilo Watt (kW) hingga puluhan Mega Watt (MW). Reaktor penelitian berperan sangat besar dalam rangka pemanfaatan teknologi nuklir di luar energi.

Pemanfaatan teknik nuklir di luar sektor energi dapat dilakukan dengan melibatkan reaktor penelitian maupun tanpa melibatkan reaktor penelitian secara langsung. Pemanfaatan yang melibatkan reaktor penelitian umumnya adalah dengan melakukan irradiasi neutron di dalam teras reaktor. Proses irradiasi neutron ini banyak dimanfaatkan untuk penelitian dalam bidang kedokteran, fisika, kimia, biologi, pertanian, industri, studi lingkungan, metalurgi bahan dan sebagainya. Sedang pemanfaatan teknik nuklir yang tidak melibatkan reaktor penelitian secara langsung biasanya dilakukan dengan memanfaatkan

radiasi yang dipancarkan oleh radioisotop atau sumber radiasi lainnya.

Reaktor penelitian seringkali dilengkapi dengan berbagai fasilitas, salah satunya adalah fasilitas doping untuk memproduksi bahan semikonduktor. Pembuatan bahan baru dengan struktur yang berbeda dari bahan aslinya dapat dilakukan dengan teknik irradiasi neutron. Karena penyerapan neutron itu, maka kestabilan inti atom bahan menjadi terganggu dan bahan akan berubah menjadi isotop lain dengan sifat fisika yang berbeda dari unsur aslinya. Teknik ini ternyata dapat dimanfaatkan untuk memproduksi bahan semikonduktor, terutama mengubah karakteristik silikon (Si) murni menjadi silikon yang terdoping dengan phosphor (P) dengan kadar tertentu, sehingga berperan sebagai bahan semikonduktor yang sangat baik.

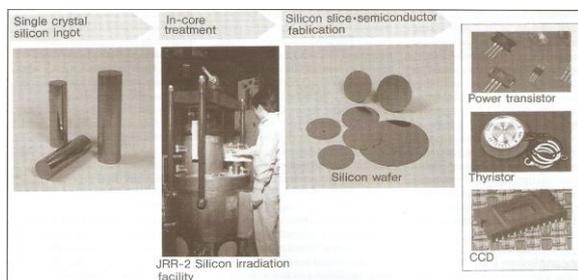
Fasilitas doping dengan transmudasi neutron (*neutron doping facility*) pada suatu reaktor nuklir untuk penelitian, dapat digunakan untuk melakukan irradiasi neutron pada sampel semikonduktor Si yang umumnya terdapat di alam dengan nomor atom 30. Karena proses irradiasi ini maka sebagian inti atom ^{30}Si akan menyerap neutron dan berubah menjadi inti atom radioaktif ^{31}Si melalui reaksi inti sebagai berikut :



Karena bersifat radioaktif, maka inti atom ^{31}Si akan melakukan peluruhan menuju ke keadaan inti atom yang stabil sehingga terbentuklah atom phosphor (P) disertai pemancaran radiasi beta negatif (β^-) atau elektron melalui proses sebagai berikut :



Waktu paro ($T_{1/2}$) dari ^{31}Si adalah 2,62 jam. Waktu paro adalah waktu yang diperlukan oleh zat radioaktif untuk meluruh sehingga jumlahnya menjadi setengah dari jumlah semula.



Gambar 4 : Proses produksi bahan semikonduktor di dalam teras reaktor nuklir

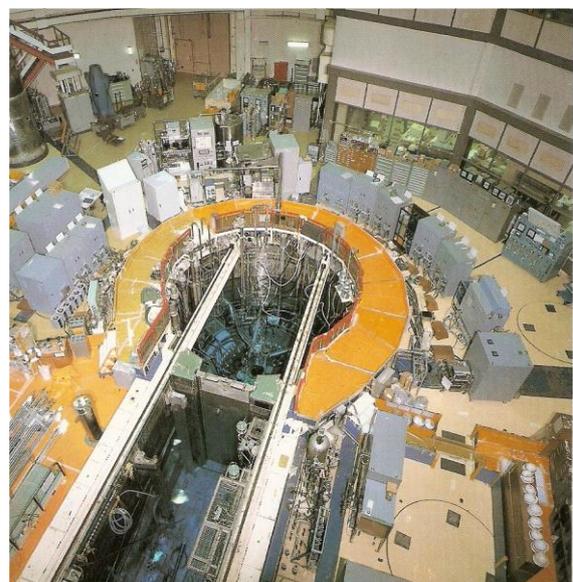
Semikonduktor Si dengan dopan P ini banyak digunakan untuk pembuatan transistor, thyristor tegangan tinggi maupun CCD untuk kamera video. Komputer elektronik generasi baru dikembangkan dengan menggunakan mikroprosesor yang makin renik sehingga secara fisik tampil dengan ukuran yang lebih kecil, namun dengan kecepatan kerja yang jauh lebih tinggi. Semakin reniknya komponen elektronik juga menuntut semakin murninya bahan semikonduktor yang digunakannya. Teknologi irradiasi

neutron ternyata mampu memenuhi tuntutan tersebut, bahkan merupakan metode terbaik yang ada saat ini untuk memproduksi bahan semikonduktor dengan tingkat kemurnian sangat tinggi.

Perkembangan teknologi telah mengantarkan elektronika beralih dari orde mikro ke nano, yang berarti komponen elektronika kelak dapat dibuat dalam ukuran seribu kali lebih kecil dibandingkan generasi mikroelektronika sebelumnya. Proses pembuatan bahan semikonduktor dengan teknik irradiasi neutron dapat dilakukan dengan hasil yang sangat baik. Kadar dopan P dapat diatur dengan teknik pengaturan waktu irradiasi yang tepat. Komponen elektronik seperti transistor biasanya sangat peka terhadap pengotoran, misal pengotoran Si pada saat pabrikasi. Dengan teknik irradiasi neutron, kehadiran pengotor-pengotor lainnya yang tidak dikehendaki dalam produksi komponen berbahan semikonduktor dapat dihindari sejak sebelum proses irradiasi.

4. Kesimpulan

Kemajuan dan perkembangan dunia elektronika dewasa ini tidak lepas dari kemajuan yang dicapai dalam studi mengenai bahan semikonduktor sebagai bahan baku utama untuk pembuatan komponen-komponen elektronika. Teknik nuklir memiliki andil yang cukup besar dalam mendukung lahirnya teknologi mikroelektronika. Saat ini telah berhasil dikembangkan suatu metode untuk memproduksi bahan semikonduktor dengan teknik nuklir. Proses pembuatan bahan semikonduktor dengan teknik irradiasi neutron di dalam teras reaktor nuklir dapat dilakukan dengan hasil yang sangat baik. Kadar dopan dalam suatu bahan semikonduktor dapat diatur dengan tingkat ketelitian sangat tinggi melalui teknik pengaturan waktu irradiasi yang tepat.



Gambar 5 : Anjungan reaktor riset untuk proses irradiasi dengan neutron

Daftar Pustaka

1. ALEXANDER, G.S., Komputer Pribadi, Ilmu Pengetahuan Populer, Vol. 9, Grolier International Inc./P.T. Widyadara (1997) hal. 247-250.
2. ANONIM, Pengantar Elektronika dan Mikroprosesor, Ilmu Pengetahuan Populer, Vol. 9, Grolier International Inc./P.T. Widyadara (1997) hal. 237-246.
3. ANONIM, Research Reactor, Current Status and teir Major Role, Tokai Research Establishment, JAERI, Japan.
4. Era Komersialisasi Bagi Nobel, Rubrik Ilmu dan Teknologi Majalah Gatra, 21 Oktober 2000, hal. 92.
5. GAUTRAEU, R. and SAVIN, W., Teori dan Sola-soal Fisika Modern, (Terjemahan oleh Hans J. Wopspakirk), Penerbit Erlangga, Jakarta 10430 (1995).
6. HALLIDAY, D. and RESNIC, R., Fisika Modern (alih bahasa oleh P. Silaban), Penerbit Erlangga, Jakarta 10430 (1990).
7. HERMAN, A., The New Physics, the Route Into Atomic Age, International Bonn-bad Godesberg, Federal Republic of Germany (1979).
8. HODDESON, L., Teori Kuantum, Ilmu Pengetahuan Populer, Vol. 5, Grolier International Inc./P.T. Widyadara (1997), Hal. 137-148.
9. INGPEN, R. and WILKINSON, P., Encyclopedia of Ideas that Changed the World, The Greatest Discoveries and Inventions of Human History, A Dragon's World Book, London (1995).
10. KRANE, K.S., Fisika Modern (Cetakan I, Terjemahan oleh : Hans J. Wopspakirk dan Sofia Niksolihin), Penerbit Universitas Indonesia, Salemba 4, Jakarta 10430 (1992).
11. LIVINGSTONE, M.S., Penghancur Atom, Ilmu Pengetahuan Populer, Vol. 10, Grolier International Inc./P.T. Widyadara (1997), Hal. 158-167.
12. Nobel Fisika 2000 untuk 'Pencipta' IC dan Pengembang Opto-Elektronika, Republika, Senin 16 Oktober 2000, hal. 14.
13. SPROWLS, R.C., Komputer, Ilmu Pengetahuan Populer, Vol. 2, Grolier International Inc./P.T. Widyadara (1997) hal. 180-192.
14. TAYLOR, J.R. and ZAFIRATOS, C.D., Modern Physics for Scientist and Engineers, Prentice Hall, Engelwood Cliffs, New Yersey 07632 (1991).
15. YOUNG, H.D. and FREEDMAN, R.A., University Physics, (9th edition), Addison-Wesley Publishing Company, New York (1998).