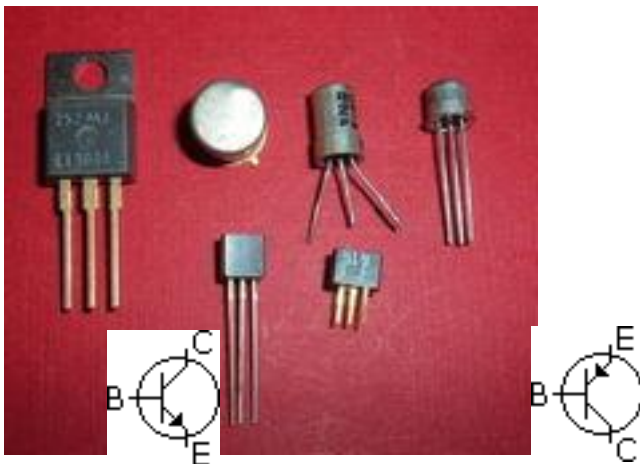


BAHAN AJAR

ELEKTRONIKA DASAR

Disusun oleh: Ahmad Fali Oklilas



**PROGRAM DIPLOMA KOMPUTER
UNIVERSITAS SRIWIJAY
2006**

**SATUAN ACARA PERKULIAHAN
MATA KULIAH ELEKTRONIKA DASAR
KODE / SKS : MTK224 / 2 SKS**

Dosen Pengasuh : Ahamad Fali Oklilas
 NIP : 132231465
 Program Studi : Teknik Komputer
 Kelas/angkatan : Teknik Komputer/2005

| Minggu ke | Pokok Bahasan | Sub Pokok Bahasan | Tujuan Instruksional Khusus | Ref. |
|------------------|--|---|--|-------------|
| 1 | Tingkat Energi Pada Zat Padat Transport Sistem Pada Semikonduktor | Pengantar Energi Atom Prinsip Dasar Pada Zat Padat Prinsip Semikonduktor | Muatan Partikel Intensitas, Tegangan dan Energi Satuan eV untuk Energi Tingkat Energi Atom Struktur Elektronik dari Element Mobilitas dan Konduktivitas Elektron dan Holes Donor dan Aseptor Kerapatan Muatan Sifat Elektrik | 1,2 |
| 2 | Karakteristik Dioda | Prinsip Dasar | Rangkaian terbuka p-n Junction Penyerarah pada p-n Junction | |
| 3 | Karakterisrik Dioda | Sifat Dioda | Sifat Volt-Ampere Sifat ketergantungan Temperatur Tahanan Dioda Kapaitas | |

| | | | | |
|---------------------|----------------------|--|---|---|
| 4 | Karakteristik Dioda | Jenis Dioda | Switching Times Breakdown Dioda Tunnel Dioda Semiconductor Photovoltaic Effect Light Emitting Diodes | |
| 5 | Rangkaian Dioda | Dasar | Dioda sebagai elemen rangkaian Prinsip garis beban Model dioda Clipping | 1 |
| 6 | Rangkaian Dioda | Lanjut | Comparator Sampling gate Penyearah Penyearah gelombang penuh Rangkaian lainnya | |
| MID TEST/UTS | | | | |
| 7 | Rangkaian Transistor | Sifat Transistor | Transistor Junction Komponen Transistor Transistor Sebagai Penguat (Amplifier) Konstruksi Transistor | |
| 8 | Rangkaian Transistor | Sifat Transistor | Konfigurasi Common Base Konfigurasi Common Emitor CE Cutoff CE Saturasi CE Current Gain Konfigurasi Common Kolektor | |
| 9 | Rangkaian Transistor | Transistor Pada Frekuensi Rendah | Analisis Grafik Konfigurasi CE Model Two Port Device Model Hybrid Parameter h | |

| | | | | |
|------------|---|--|--|---|
| 10 | Rangkaian Transistor | Transistor Pada Frekuensi Rendah | Thevenin & Norton Emitter Follower Membandingkan Konfigurasi Amplifier Teori Miller | 1 |
| 11 | Rangkaian Transistor Field Effect Transistor | Transistor Pada frekuensi Tinggi Sifat Dasar Rangkaian Dasar | Model Hybrid JFET Karakteristik Volt Amper FET MOSFET Voltage Variable Resistor | |
| 12 | Studi Kasus | Penerapan Transistor | Sebagai Osilator Sebagai Penguat Sebagai Sensor | |
| FINAL TEST | | | | |

Buku Acuan :

1. Chattopadhyay, D. dkk, *Dasar Elektronika*, Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta:1989.
2. Millman, Halkias, *Integrated Electronics*, Mc Graw Hill, Tokyo, 1988
3. <http://WWW.id.wikipedia.org>
4. <http://www.tpub.com/content/>
5. <http://www.electroniclab.com/>

ATURAN PERKULIAHAN ELEKTRONIKA DASAR

DAFTAR HADIR MIN = 80% X 16 = 14

KOMPONEN NILAI

TUGAS/QUIS = 25%

UTS = 30%

UAS = 45%

Nilai Mutlak

86 – 100 = A

71 – 85 = B

56 – 70 = C

41 – 55 = D

≤ 40 = E

Keterlambatan kehadiran dengan toleransi 15 menit

Buku Acuan :

6. Chattopadhyay, D. dkk, *Dasar Elektronika*, Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta:1989.
7. Millman, Halkias, *Integrated Electronics*, Mc Graw Hill, Tokyo, 1988
8. <http://WWW.id.wikipedia.org>
9. <http://www.tpub.com/content/>
10. <http://www.electroniclab.com/>

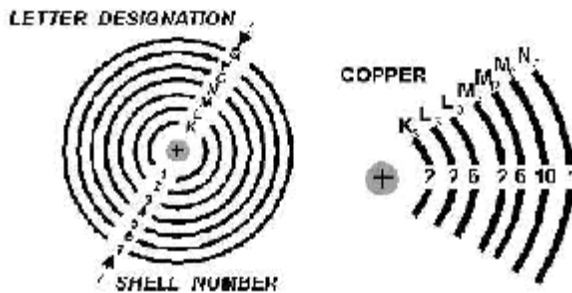
Tingkat Energi Pada Zat Padat

Electron's Energy Level

The NEUTRON is a neutral particle in that it has no electrical charge. The mass of the neutron is approximately equal to that of the proton.

An ELECTRON'S ENERGY LEVEL is the amount of energy required by an electron to stay in orbit. Just by the electron's motion alone, it has kinetic energy. The electron's position in reference to the nucleus gives it potential energy. An energy balance keeps the electron in orbit and as it gains or loses energy, it assumes an orbit further from or closer to the center of the atom.

SHELLS and SUBSHELLS are the orbits of the electrons in an atom. Each shell can contain a maximum number of electrons, which can be determined by the formula $2n^2$. Shells are lettered K through Q, starting with K, which is the closest to the nucleus. The shell can also be split into four subshells labeled s, p, d, and f, which can contain 2, 6, 10, and 14 electrons, respectively.



VALENCE is the ability of an atom to combine with other atoms. The valence of an atom is determined by the number of electrons in the atom's outermost shell. This shell is referred to as the VALENCE SHELL. The electrons in the outermost shell are called VALENCE ELECTRONS.

IONIZATION is the process by which an atom loses or gains electrons. An atom that loses some of its electrons in the process becomes positively charged and is called a POSITIVE ION. An atom that has an excess number of electrons is negatively charged and is called a NEGATIVE ION.

ENERGY BANDS are groups of energy levels that result from the close proximity of atoms in a solid. The three most important energy bands are the CONDUCTION BAND, FORBIDDEN BAND, and VALENCE BAND.

Electrons and holes in semiconductors

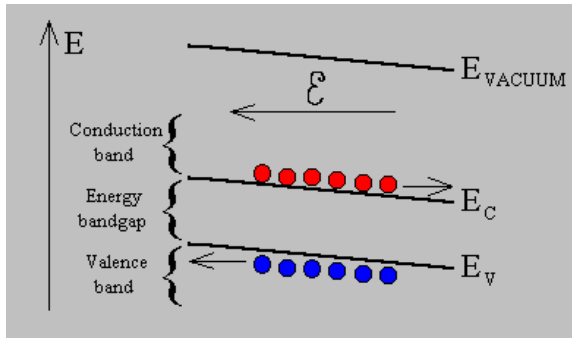
As pointed out before, semiconductors distinguish themselves from metals and insulators by the fact that they contain an "almost-empty" conduction band and an "almost-full" valence band. This also means that we will have to deal with the transport of carriers in both bands.

To facilitate the discussion of the transport in the "almost-full" valence band we will introduce the concept of holes in a semiconductor. It is important for the reader to understand that one could deal with only electrons (since these are the only real particles available in a semiconductor) if one is willing to keep track of all the electrons in the "almost-full" valence band.

The concepts of holes is introduced based on the notion that it is a whole lot easier to keep track of the missing particles in an "almost-full" band, rather than keeping track of the actual electrons in that band. We will now first explain the concept of a hole and then point out how the hole concept simplifies the analysis.

Holes are missing electrons. They behave as particles with the same properties as the electrons would have occupying the same states except that they carry a positive charge. This definition is illustrated further with the figure below which presents

the simplified energy band diagram in the presence of an electric field.



band1.gif

Fig.2.2.12 Energy band diagram in the presence of a uniform electric field. Shown are electrons (red circles) which move against the field and holes (blue circles) which move in the direction of the applied field.

A uniform electric field is assumed which causes a constant gradient of the conduction and valence band edges as well as a constant gradient of the vacuum level. The gradient of the vacuum level requires some further explanation since the vacuum level is associated with the potential energy of the electrons outside the semiconductor. However the gradient of the vacuum level represents the electric field within the semiconductor.

The electrons in the conduction band are negatively charged particles which therefore move in a direction which opposes the direction of the field. Electrons therefore move *down hill* in the conduction band. Electrons in the valence band also move in the same direction. The total current due to the electrons in the valence band can therefore be written as:

$$J_{vb} = \frac{1}{V} \sum_{\text{filled states}} (-q)v_i \quad (\text{f36})$$

where V is the volume of the semiconductor, q is the electronic charge and v is the electron velocity. The sum is taken over all occupied or filled states in the valence band. This expression can be reformulated by first taking the sum over all the states in the valence band and subtracting the current due to the electrons which are actually missing in the valence band. This last term therefore represents the sum taken over all the empty states in the valence band, or:

$$J_{vb} = \frac{1}{V} \left(\sum_{\text{all states}} (q)v_i - \sum_{\text{empty states}} (q)v_i \right) \quad (f37)$$

The sum over all the states in the valence band has to equal zero since electrons in a completely filled band do not contribute to current, while the remaining term can be written as:

$$J_{vb} = \frac{1}{V} \sum_{\text{empty states}} (+q)v_i \quad (f38)$$

which states that the current is due to positively charged particles associated with the empty states in the valence band. We call these particles *holes*. Keep in mind that there is no real particle associated with a hole, but rather that the combined behavior of all the electrons which occupy states in the valence band is the same as that of positively charge particles associated with the unoccupied states.

The reason the concept of holes simplifies the analysis is that the density of states function of a whole band can be rather complex. However it can be dramatically simplified if only states close to the band edge need to be considered.

As illustrated by the above figure, the holes move in the direction of the field (since they are positively charged particles). They move upward in the energy band diagram similar to air bubbles in a tube filled with water which is closed on each end.

Distribution functions

1. Introduction

The distribution or probability density functions describe the probability with which one can expect particles to occupy the available energy levels in a given system. While the actual derivation belongs in a course on statistical thermodynamics it is of interest to understand the initial assumptions of such derivations and therefore also the applicability of the results.

The [derivation](#) starts from the basic notion that any possible distribution of particles over the available energy levels has the same probability as any other possible distribution, which can be distinguished from the first one.

In addition, one takes into account the fact that the total number of particles as well as the total energy of the system has a specific value.

Third, one must acknowledge the different behavior of different particles. Only one Fermion can occupy a given energy level (as described by a unique set of quantum numbers including spin). The number of bosons occupying the same energy levels is unlimited. Fermions and Bosons all "look alike" i.e. they are indistinguishable. Maxwellian particles can be distinguished from each other.

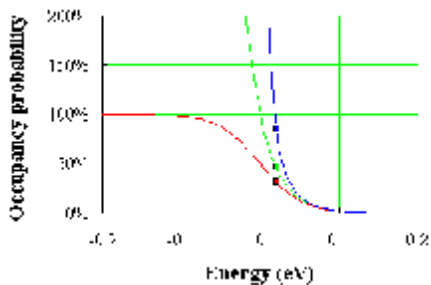
The [derivation](#) then yields the most probable distribution of particles by using the Lagrange method of indeterminate constants. One of the Lagrange constants, namely the one associated with the average energy per particle in the distribution, turns out to be a more meaningful physical variable than the total energy. This variable is called the Fermi energy, E_F .

An essential assumption in the derivation is that one is dealing with a *very* large number of particles. This assumption enables to approximate the factorial terms using the [Stirling approximation](#).

The resulting distributions do have some peculiar characteristics, which are hard to explain. First of all the fact that a probability of occupancy can be obtained independent of whether a particular energy level exists or not. It would seem more acceptable that the distribution function does depend on the density of available states, since it determines where particles can be in the first place.

The fact that the distribution function does not depend on the density of states is due to the assumption that a particular energy level is in thermal equilibrium with a large number of other particles. The nature of these particles does not need to be described further as long as their number is indeed very large. The independence of the density of states is very fortunate since it provides a single distribution function for a wide range of systems.

A plot of the three distribution functions, the [Fermi-Dirac](#) distribution, the [Maxwell-Boltzmann](#) distribution and the [Bose-Einstein](#) distribution is shown in the figure below, where the Fermi energy was set equal to zero.



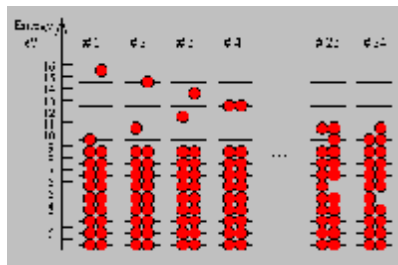
distrib.xls - distrib.gif

Fig. 2.4.1 Occupancy probability versus energy of the Fermi-Dirac (red curve), the Bose-Einstein (green curve) and the Maxwell-Boltzmann (blue curve) distribution.

All three distribution functions are almost equal for large energies (more than a few kT beyond the Fermi energy). The Fermi-Dirac distribution reaches a maximum of 1 for energies which are a few kT below the Fermi energy, while the Bose-Einstein distribution diverges at the Fermi energy and has no validity for energies below the Fermi energy.

2. An Example

To better understand the general derivation we are going through it, we now consider a system with equidistant energy levels at 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, ... eV, which each can contain two electrons. The electrons are Fermions so that they are indistinguishable from each other and no more than two electrons (with opposite spin) can occupy a given energy level. This system contains 20 electrons and we arbitrarily set the total energy at 106 eV, which is 6 eV more than the minimum possible energy of this system. There are 24 possible and different configurations, which satisfy these particular constraints. Six of those configurations are shown in the figure below, where the red dots represent the electrons:



occdraw.gif

Fig. 2.4.2 Six of the 24 possible configurations in which 20 electrons can be placed having an energy of 106 eV.

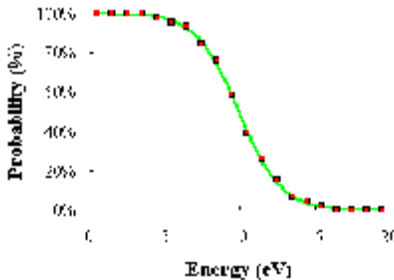
A complete list of the 24 configurations is shown in the table below:

| Energy | #1 | #2 | #3 | #4 | #5 | #6 | #7 | #8 | #9 | #10 | #11 | #12 | #13 | #14 | #15 | #16 | #17 | #18 | #19 | #20 | #21 | #22 | #23 | #24 | |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| 15.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 4.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

fddist.xls - octable.gif

Table 2.4.1 All 24 possible configurations in which 20 electrons can be placed having an energy of 106 eV.

The average occupancy of each energy level as taken over all (and equally probable) 24 configurations is compared in the figure below to the expected Fermi-Dirac distribution function. A best fit was obtained using a Fermi energy of 9.998 eV and $kT = 1.447$ eV or $T = 16,800$ K. The agreement is surprisingly good considering the small size of this system.



fddist.xls - occprob.gif

Fig. 2.4.3 Probability versus energy averaged over the 24 possible configurations of the example (red squares) fitted with a Fermi-Dirac function (green curve) using $kT = 1.447$ eV and $E_F = 9.998$ eV.

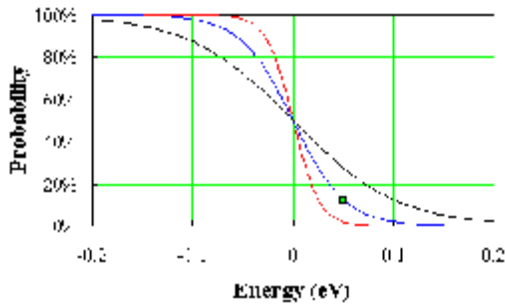
3. The Fermi-Dirac distribution function

The Fermi-Dirac probability density function provides the probability that an energy level is occupied by a Fermion which is in thermal equilibrium with a large reservoir. Fermions are by definition particles with half-integer spin ($1/2, 3/2, 5/2 \dots$). A unique characteristic of Fermions is that they obey the Pauli exclusion principle which states that only one Fermion can occupy a state which is defined by its set of quantum numbers n, k, l and s . The definition of Fermions could therefore also be particles which obey the Pauli exclusion principle. All such particles also happen to have a half-integer spin.

Electrons as well as holes have a spin $1/2$ and obey the Pauli exclusion principle. As these particles are added to an energy band, they will fill the available states in an energy band just like water fills a bucket. The states with the lowest energy are filled first, followed by the next higher ones. At absolute zero temperature ($T = 0$ K), the energy levels are all filled up to a maximum energy which we call the Fermi level. No states above the Fermi level are filled. At higher temperature one finds that the transition between completely filled states and completely empty states is gradual rather than abrupt. The Fermi function which describes this behavior, is given by:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \quad (\text{f18})$$

This function is plotted in the figure below.



fermi.xls - fermi.gif

Fig. 2.4.4 Fermi function at an ambient temperature of 150 K (red curve), 300 K (blue curve) and 600 K (black curve).

The Fermi function has a value of one for energies, which are more than a few times kT below the Fermi energy. It equals $1/2$ if the energy equals the Fermi energy and decreases exponentially for energies which are a few times kT larger than the Fermi energy. While at $T = 0$ K the Fermi function equals a step function, the transition is more gradual at finite temperatures and more so at higher temperatures.

4. Impurity distribution functions

The distribution function of impurities differs from the Fermi-Dirac distribution function although the particles involved are Fermions. The difference is due to the fact that a filled donor energy level contains only one electron which can have either spin (spin up or spin down), while having two electrons with opposite spin occupy this one level is not allowed since this would leave a negatively charged atom which would have a different energy as the donor energy. This yields a modified distribution function for donors as given by:

$$f_{donor}(E_D) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} e^{(E_D - E_F)/kT}} \quad (f25)$$

The main difference is the factor 1/2 in front of the exponential term.

The distribution function for acceptors differs also because of the different possible ways to occupy the acceptor level. The neutral acceptor contains two electrons with opposite spin, the ionized acceptor still contains one electron which can have either spin, while the doubly positive state is not allowed since this would require a different energy. This restriction would yield a factor of 2 in front of the exponential term. In addition, one finds that most commonly used semiconductors have a two-fold degenerate valence band, which causes this factor to increase to 4 yielding:

$$f_{acceptor}(E_A) = \frac{1}{1 + 4 e^{(E_A - E_F)/kT}} \quad (f26)$$

5. The Bose-Einstein distribution function

$$f_{BE}(E) = \frac{1}{e^{(E - E_F)/kT} - 1} \quad (f27)$$

6. The Maxwell-Boltzmann distribution function

$$f_{MB}(E) = \frac{1}{e^{(E - E_F)/kT}} \quad (f28)$$

7. Semiconductor thermodynamics

In order to understand the carrier distribution functions one must be familiar with a variety of thermodynamic concepts. These include [thermal equilibrium](#), [the difference](#) between the total energy and heat, work and particle energy and the meaning of the [Fermi energy](#). These and other related topics are discussed in the section on semiconductor [thermodynamics](#). An ideal electron gas is discussed in more detail as an [example](#)

Semikonduktor

Prinsip Dasar

Semikonduktor merupakan elemen dasar dari komponen elektronika seperti dioda, transistor dan sebuah IC (*integrated circuit*).

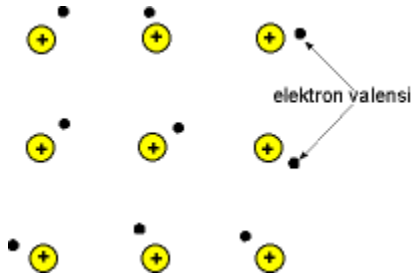
Disebut semi atau setengah konduktor, karena bahan ini memang bukan konduktor murni.

Bahan-bahan logam seperti tembaga, besi, timah disebut sebagai konduktor yang baik sebab logam memiliki susunan atom yang sedemikian rupa, sehingga elektronnya dapat bergerak bebas.

Sebenarnya atom tembaga dengan lambang kimia Cu memiliki inti 29 ion (+) dikelilingi oleh 29 elektron (-). Sebanyak 28 elektron menempati orbit-orbit bagian dalam membentuk inti yang disebut nucleus.

Dibutuhkan energi yang sangat besar untuk dapat melepaskan ikatan elektron-elektron ini. Satu buah elektron lagi yaitu elektron yang ke-29, berada pada orbit paling luar.

Orbit terluar ini disebut pita valensi dan elektron yang berada pada pita ini dinamakan elektron valensi. Karena hanya ada satu elektron dan jaraknya 'jauh' dari nucleus, ikatannya tidaklah terlalu kuat. Hanya dengan energi yang sedikit saja elektron terluar ini mudah terlepas dari ikatannya.



ikatan atom tembaga

Pada suhu kamar, elektron tersebut dapat bebas bergerak atau berpindah-pindah dari satu nucleus ke nucleus lainnya. Jika diberi tegangan potensial listrik, elektron-elektron tersebut dengan mudah berpindah ke arah potensial yang sama. Phenomena ini yang dinamakan sebagai arus listrik.

Isolator adalah atom yang memiliki elektron valensi sebanyak 8 buah, dan dibutuhkan energi yang besar untuk dapat melepaskan elektron-elektron ini.

Dapat ditebak, semikonduktor adalah unsur yang susunan atomnya memiliki elektron valensi lebih dari 1 dan kurang dari 8. Tentu saja yang paling "semikonduktor" adalah unsur yang atomnya memiliki 4 elektron valensi.

Susunan Atom Semikonduktor

Bahan semikonduktor yang banyak dikenal contohnya adalah Silicon (Si), Germanium (Ge) dan Galium Arsenida (GaAs).

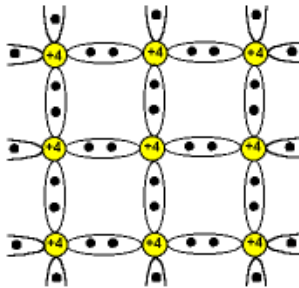
Germanium dahulu adalah bahan satu-satunya yang dikenal untuk membuat komponen semikonduktor. Namun belakangan, silikon menjadi populer setelah ditemukan cara mengekstrak bahan ini dari alam. Silikon merupakan bahan terbanyak ke dua yang ada di bumi setelah oksigen (O₂).

Pasir, kaca dan batu-batuan lain adalah bahan alam yang banyak mengandung unsur

silikon. Dapatkah anda menghitung jumlah pasir dipantai.

Struktur atom kristal silikon, satu inti atom (*nucleus*) masing-masing memiliki 4 elektron valensi.

Ikatan inti atom yang stabil adalah jika dikelilingi oleh 8 elektron, sehingga 4 buah elektron atom kristal tersebut membentuk ikatan kovalen dengan ion-ion atom tetangganya. Pada suhu yang sangat rendah (0°K), struktur atom silikon divisualisasikan seperti pada gambar berikut.



struktur dua dimensi kristal Silikon

Ikatan kovalen menyebabkan elektron tidak dapat berpindah dari satu inti atom ke inti atom yang lain. Pada kondisi demikian, bahan semikonduktor bersifat isolator karena tidak ada elektron yang dapat berpindah untuk menghantarkan listrik.

Pada suhu kamar, ada beberapa ikatan kovalen yang lepas karena energi panas, sehingga memungkinkan elektron terlepas dari ikatannya. Namun hanya beberapa jumlah kecil yang dapat terlepas, sehingga tidak memungkinkan untuk menjadi konduktor yang baik.

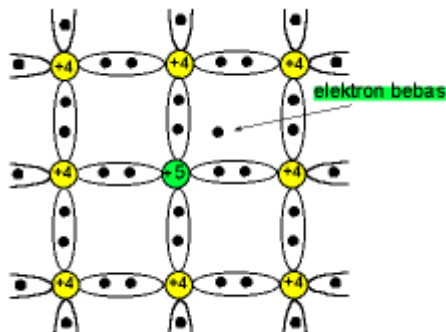
Ahli-ahli fisika terutama yang menguasai fisika quantum pada masa itu mencoba memberikan doping pada bahan semikonduktor ini.

Pemberian doping dimaksudkan untuk mendapatkan elektron valensi bebas dalam jumlah lebih banyak dan permanen, yang diharapkan akan dapat menghantarkan listrik. Kenyataannya demikian, mereka memang iseng sekali dan jenius.

Tipe-N

Misalnya pada bahan silikon diberi doping *phosphorus* atau *arsenic* yang pentavalen yaitu bahan kristal dengan inti atom memiliki 5 elektron valensi. Dengan doping, Silikon yang tidak lagi murni ini (*impurity semiconductor*) akan memiliki kelebihan elektron.

Kelebihan elektron membentuk semikonduktor tipe-n. Semikonduktor tipe-n disebut juga donor yang siap melepaskan elektron.



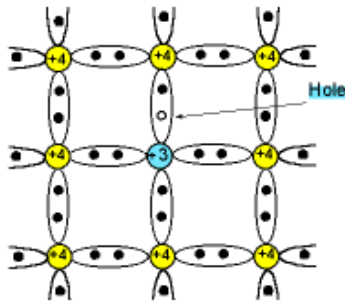
doping atom pentavalen

Tipe-P

Kalau silikon diberi doping *Boron*, *Gallium* atau *Indium*, maka akan didapat semikonduktor tipe-p. Untuk mendapatkan silikon tipe-p, bahan dopingnya adalah bahan trivalen yaitu unsur dengan ion yang memiliki 3 elektron pada pita valensi.

Karena ion silikon memiliki 4 elektron, dengan demikian ada ikatan kovalen yang bolong (*hole*). Hole

ini digambarkan sebagai akseptor yang siap menerima elektron. Dengan demikian, kekurangan elektron menyebabkan semikonduktor ini menjadi tipe-p.



doping atom trivalen

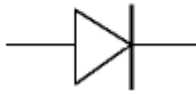
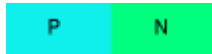
Resistansi

Semikonduktor tipe-p atau tipe-n jika berdiri sendiri tidak lain adalah sebuah resistor. Sama seperti resistor karbon, semikonduktor memiliki resistansi. Cara ini dipakai untuk membuat resistor di dalam sebuah komponen semikonduktor. Namun besar resistansi yang bisa didapat kecil karena terbatas pada volume semikonduktor itu sendiri.

Dioda

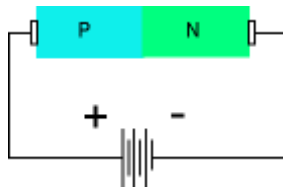
Dioda PN

Jika dua tipe bahan semikonduktor ini dilekatkan, maka akan didapat sambungan P-N (*p-n junction*) yang dikenal sebagai dioda. Pada pembuatannya memang material tipe P dan tipe N bukan disambung secara harfiah, melainkan dari satu bahan (*monolithic*) dengan memberi doping (*impurity material*) yang berbeda.



sambungan p-n

Jika diberi tegangan maju (*forward bias*), dimana tegangan sisi P lebih besar dari sisi N, elektron dengan mudah dapat mengalir dari sisi N mengisi kekosongan elektron (*hole*) di sisi P.



forward bias

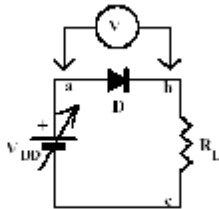
Sebaliknya jika diberi tegangan balik (*reverse bias*), dapat dipahami tidak ada elektron yang dapat mengalir dari sisi N mengisi hole di sisi P, karena tegangan potensial di sisi N lebih tinggi.

Dioda akan hanya dapat mengalirkan arus satu arah saja, sehingga dipakai untuk aplikasi rangkaian penyearah (*rectifier*). Dioda, Zener, LED, Varactor dan Varistor adalah beberapa komponen semikonduktor sambungan PN yang dibahas pada kolom khusus.

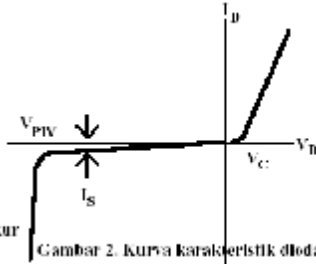
Kita dapat menyelidiki karakteristik statik dioda, dengan cara memasang dioda seri dengan sebuah catu daya dc dan sebuah resistor.

Kurva karakteristik statik dioda

merupakan fungsi dari arus I_D , arus yang melalui dioda, terhadap tegangan V_D , beda tegang antara titik a dan b (lihat gambar 1 dan gambar 2)



Gambar 1. Rangkaian untuk mengukur karakteristik statik dioda



Gambar 2. Kurva karakteristik dioda

karakteristik statik dioda

Karakteristik statik dioda dapat diperoleh dengan mengukur tegangan dioda (V_{ab}) dan arus yang melalui dioda, yaitu I_D . Dapat diubah dengan dua cara, yaitu mengubah V_{DD} . Bila arus dioda I_D kita plotkan terhadap tegangan dioda V_{ab} , kita peroleh karakteristik statik dioda. Bila anoda berada pada tegangan lebih tinggi daripada katoda (V_D positif) dioda dikatakan mendapat bias forward. Bila V_D negatif disebut bias reserve atau bias mundur. Pada gambar 2 V_C disebut cut-in-voltage, I_S arus saturasi dan V_{PIV} adalah peak-inverse voltage.

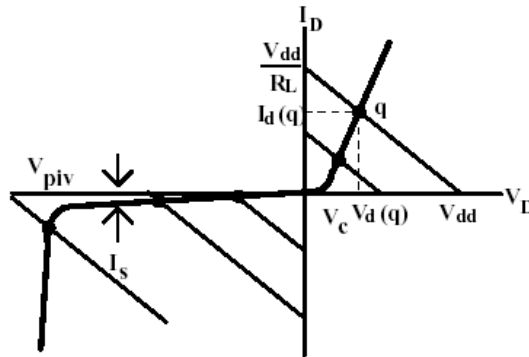
Bila harga V_{DD} diubah, maka arus I_D dan V_D akan berubah pula. Bila kita mempunyai karakteristik statik dioda dan kita tahu harga V_{DD} dan R_L , maka harga arus I_D dan V_D dapat kita tentukan sebagai berikut. Dari gambar 1.

$$V_{DD} = V_{ab} + (I \cdot R_L) \text{ atau}$$

$$I = -(V_{ab}/R_L) + (V_{DD} / R_L)$$

Bila hubungan di atas kita lukiskan pada karakteristik statik dioda kita akan mendapatkan garis

lurus dengan kemiringan $(1/R_L)$. Garis ini disebut garis beban (load line). Ini ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Kurva karakteristik dan garis beban

Kita lihat bahwa garis beban memotong sumbu V dioda pada harga V_{DD} yaitu bila arus $I=0$, dan memotong sumbu I pada harga (V_{DD}/R_L) . Titik potong antara karakteristik statik dengan garis beban memberikan harga tegangan dioda $V_D(q)$ dan arus dioda $I_D(q)$.

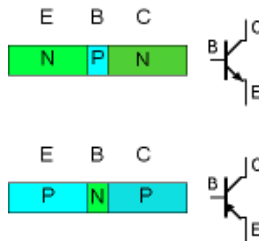
Dengan mengubah harga V_{DD} kita akan mendapatkan garis-garis beban sejajar seperti pada gambar 3.

Bila $V_{DD} < 0$ dan $|V_{DD}| < V_{PIV}$ maka arus dioda yang mengalir adalah kecil sekali, yaitu arus saturasi I_s . Arus ini mempunyai harga kira-kira $1 \mu A$ untuk dioda silikon.

Transistor Bipolar

Transistor merupakan dioda dengan dua sambungan (*junction*). Sambungan itu membentuk transistor PNP maupun NPN. Ujung-ujung terminalnya berturut-turut disebut emitor, base dan kolektor. Base selalu berada di tengah, di antara emitor dan kolektor.

Transistor ini disebut transistor bipolar, karena struktur dan prinsip kerjanya tergantung dari perpindahan elektron di kutup negatif mengisi kekurangan elektron (hole) di kutup positif. $\beta = 2$ dan polar = kutup. Adalah William Schockley pada tahun 1951 yang pertama kali menemukan transistor bipolar.



Transistor npn dan pnp

Akan dijelaskan kemudian, transistor adalah komponen yang bekerja sebagai sakelar (*switch on/off*) dan juga sebagai penguat (*amplifier*). Transistor bipolar adalah inovasi yang menggantikan transistor tabung (*vacum tube*). Selain dimensi transistor bipolar yang relatif lebih kecil, disipasi dayanya juga lebih kecil sehingga dapat bekerja pada suhu yang lebih dingin.

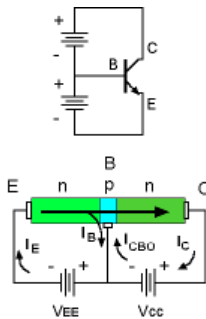
Dalam beberapa aplikasi, transistor tabung masih digunakan terutama pada aplikasi audio, untuk mendapatkan kualitas suara yang baik, namun konsumsi dayanya sangat besar. Sebab untuk dapat melepaskan elektron, teknik yang digunakan adalah pemanasan filamen seperti pada lampu pijar.

Bias DC

Transistor bipolar memiliki 2 junction yang dapat disamakan dengan penggabungan 2 buah dioda. Emiter-Base adalah satu junction dan Base-Kolektor junction lainnya. Seperti pada dioda, arus hanya akan

mengalir hanya jika diberi bias positif, yaitu hanya jika tegangan pada material P lebih positif daripada material N (*forward bias*).

Pada gambar ilustrasi transistor NPN berikut ini, junction base-emiter diberi bias positif sedangkan base-colector mendapat bias negatif (*reverse bias*).



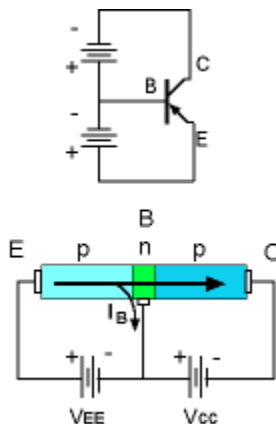
arus elektron transistor npn

Karena base-emiter mendapat bias positif maka seperti pada dioda, elektron mengalir dari emiter menuju base. Kolektor pada rangkaian ini lebih positif sebab mendapat tegangan positif. Karena kolektor ini lebih positif, aliran elektron bergerak menuju kutup ini. Misalnya tidak ada kolektor, aliran elektron seluruhnya akan menuju base seperti pada dioda. Tetapi karena lebar base yang sangat tipis, hanya sebagian elektron yang dapat bergabung dengan hole yang ada pada base.

Sebagian besar akan menembus lapisan base menuju kolektor. Inilah alasannya mengapa jika dua dioda digabungkan tidak dapat menjadi sebuah transistor, karena persyaratannya adalah lebar base harus sangat tipis sehingga dapat diterjang oleh elektron. Jika misalnya tegangan base-emiter dibalik (*reverse bias*), maka tidak akan terjadi aliran elektron dari emitor menuju kolektor.

Jika pelan-pelan 'keran' base diberi bias maju (*forward bias*), elektron mengalir menuju kolektor dan besarnya sebanding dengan besar arus bias base yang diberikan. Dengan kata lain, arus base mengatur banyaknya elektron yang mengalir dari emiter menuju kolektor. Ini yang dinamakan efek penguatan transistor, karena arus base yang kecil menghasilkan arus emiter-colector yang lebih besar.

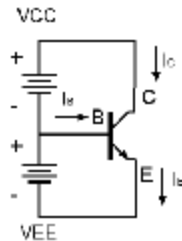
Istilah *amplifier* (penguatan) menjadi salah kaprah, karena dengan penjelasan di atas sebenarnya yang terjadi bukan penguatan, melainkan arus yang lebih kecil mengontrol aliran arus yang lebih besar. Juga dapat dijelaskan bahwa base mengatur membuka dan menutup aliran arus emiter-kolektor (*switch on/off*). Pada transistor PNP, fenomena yang sama dapat dijelaskan dengan memberikan bias seperti pada gambar berikut. Dalam hal ini yang disebut perpindahan arus adalah arus hole.



arus hole transistor pnp

Untuk memudahkan pembahasan prinsip bias transistor lebih lanjut, berikut adalah terminologi parameter transistor. Dalam hal ini arah arus adalah

dari potensial yang lebih besar ke potensial yang lebih kecil.



arus potensial

IC : arus kolektor

IB : arus base

IE : arus emitor

VC : tegangan kolektor

VB : tegangan base

VE : tegangan emitor

VCC : tegangan pada kolektor

VCE : tegangan jepit kolektor-emitor

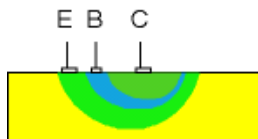
VEE : tegangan pada emitor

VBE : tegangan jepit base-emitor

ICBO : arus base-kolektor

VCB : tegangan jepit kolektor-base

Perlu diingat, walaupun tidak perbedaan pada doping bahan pembuat emitor dan kolektor, namun pada prakteknya emitor dan kolektor tidak dapat dibalik.



penampang transistor bipolar

Dari satu bahan silikon (*monolithic*), emitor dibuat terlebih dahulu, kemudian base dengan doping yang berbeda dan terakhir adalah kolektor. Terkadang dibuat juga efek dioda pada terminal-terminalnya sehingga arus hanya akan terjadi pada arah yang dikehendaki.

Pengenalan vacuum Tube

Pada bagian ini penulis bermaksud mengajak para rekan rekan tube mania untuk ngobrol mengenai prinsip kerja dari Tabung.

1. Emisi Electron

Membahas mengenai cara kerja tabung tak akan bisa lepas dari Proses *Emisi Electron* karena sesungguhnya cara kerja tabung yang paling mendasar ialah proses emisi elektron dan pengendaliannya. Emisi elektron ialah proses pelepasan elektron dari permukaan suatu substansi atau material yang disebabkan karena elektron tersebut mendapat energi dari luar.

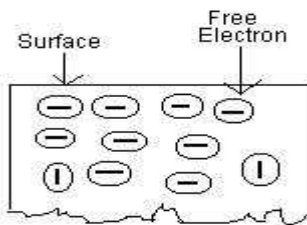


Figure 1

Dalam realita yang ada proses emisi elektron cenderung terjadi pada logam dibandingkan pada bahan lainnya, hal ini disebabkan karena logam banyak memiliki elektron bebas yang selalu bergerak setiap saat. Banyaknya elektron bebas pada logam disebabkan karena daya tarik ini atom logam terhadap elektron, terutama pada elektron yang terletak pada kulit terluar dari atom logam (elektron valensi) tidak terlalu kuat dibandingkan yang terjadi pada bahan lainnya. Akan tetapi walaupun daya tarik tersebut tidak

terlalu kuat, masalah cukup untuk menahan elektron agar tidak sampai lepas dari atom logam. Agar supaya elektron pada logam bisa melompat keluar melalui permukaan logam, sehingga terjadi proses emisi elektron, maka diperlukanlah sejumlah energi untuk mengatasi daya tarik inti atom terhadap elektron. Besarnya energi yang diperlukan oleh sebuah elektron untuk mengatasi daya tarik inti atom sehingga bisa melompat keluar dari permukaan logam, didefinisikan sebagai Fungsi Kerja (Work Function). Fungsi kerja biasanya dinyatakan dalam satuan eV (electron volt), besarnya fungsi kerja adalah berbeda untuk setiap logam.

Proses penerimaan energi luar oleh elektron agar bisa beremisi dapat terjadi dengan beberapa cara, dan jenis proses penerimaan energi inilah yang membedakan proses emisi elektron yaitu :

1. Emisi Thermionic (Thermionic emission)
2. Emisi medan listrik (Field emission)
3. Emisi Sekunder (Secondary emission)
4. Emisi Fotolistrik (Photovoltaic emission)

2. Emisi Thermionic

Pada emisi jenis ini, energi luar yang masuk ke bahan ialah dalam bentuk energi panas. Oleh elektron energi panas ini diubah menjadi energi kinetik. Semakin besar panas yang diterima oleh bahan maka akan semakin besar pula kenaikan energi kinetik yang terjadi pada elektron, dengan semakin besarnya kenaikan energi kinetik dari elektron maka gerakan elektron menjadi semakin cepat dan semakin tidak menentu. Pada situasi inilah akan terdapat elektron yang pada akhirnya terlepas keluar melalui permukaan bahan.

Pada proses emisi thermionic dan juga pada proses emisi lainnya, bahan yang digunakan sebagai asal ataupun sumber elektron disebut sebagai "emiter"

atau lebih sering disebut "katoda" (cathode), sedangkan bahan yang menerima elektron disebut sebagai anoda. Dalam konteks tabung hampa (vacuum tube) anoda lebih sering disebut sebagai "plate". Dalam proses emisi termionik dikenal dua macam jenis katoda yaitu :

- a) Katoda panas langsung (Direct Heated Cathode, disingkat DHC)
- b) Katoda panas tak langsung (Indirect Heated Cathode, disingkat IHC)

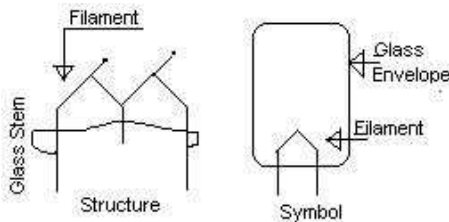


Figure 2
Directly Heated Cathode (DHC)

Pada Figure 2 dapat dilihat struktur yang disederhanakan dan juga simbol dari DHC, pada katoda jenis ini katoda selain sebagai sumber elektron juga dialiri oleh arus

heater (pemanas).

Struktur yang disederhanakan dan juga simbol dari IHC dapat dilihat pada Figure 3. Katoda jenis ini tidak dialiri langsung oleh arus heater, panas yang dibutuhkan untuk memanasi katoda dihasilkan oleh heater element (elemen pemanas) dan panas ini dialirkan secara konduksi dari heater elemen ke katoda dengan perantara insulasi listrik, yaitu bahan yang baik dalam menghantarkan panas tetapi tidak mengalirkan arus listrik. Pada proses emisi termionik bahan yang akan digunakan sebagai katoda harus memiliki sifat-sifat yang memadai untuk berperan dalam proses yaitu :

- a. Memiliki fungsi kerja yang rendah, dengan fungsi kerja yang rendah maka energi yang dibutuhkan

untuk menarik elektron menjadi lebih kecil sehingga proses emisi lebih mudah terjadi.

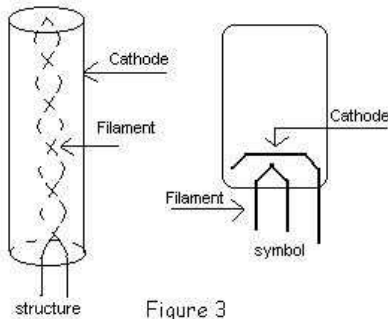


Figure 3
Indirect Heated Cathode (IHC)

b. Memiliki titik lebur (melting point) yang tinggi. Pada proses emisi thermionic katoda harus dipanaskan pada suhu yang cukup tinggi untuk memungkinkan terjadinya lompatan elektron, dan suhu ini

bisa mencapai 1500 derajat celcius.

C. Memiliki ketahanan mekanik (mechanical strenght) yang tinggi Pada saat terjadinya emisi maka terjadi pula lompatan ion positif dari plate menuju ke katoda. Lompatan ion positif tersebut oleh katoda akan dirasakan sebagai benturan, sehingga agar supaya katoda tidak mengalami deformasi maka bahan dari katoda harus memiliki mechanical strenght yang tinggi. Pada aplikasi yang sesungguhnya ada tiga jenis material yang digunakan untuk membuat katoda, yaitu :

3. Tungsten

Material ini adalah material yang pertama kali digunakan orang untuk membuat katode. Tungsten memiliki dua kelebihan untuk digunakan sebagai katoda yaitu memiliki ketahanan mekanik dan juga titik lebur yang tinggi (sekitar 3400 derajat Celcius), sehingga tungsten banyak digunakan untuk aplikasi khas yaitu tabung X-Ray yang bekerja pada tegangan sekitar 5000V dan temperature tinggi. Akan tetapi untuk aplikasi yang umum terutama untuk aplikasi Tabung Audio dimana tegangan kerja dan temperature

tidak terlalu tinggi maka tungsten bukan material yang ideal, hal ini disebabkan karena tungsten memiliki fungsi kerja yang tinggi(4,52 eV) dan juga temperature kerja optimal yang cukup tinggi (sekitar 2200 derajat celcius)

4. Thoriated Tungsten

Material ini ialah campuran antara tungsten dan thorium. Thorium adalah material yang secara individual memiliki fungsi kerja 3,4 eV, campuran antara thorium dan tungsten memiliki fungsi kerja 2,63eV, yaitu suatu nilai fungsi kerja yang lebih rendah dibandingkan dengan fungsi kerja tungsten ataupun thorium dalam keadaan tidak dicampur. Selain itu hasil pencampuran kedua logam tersebut memiliki temperature kerja optimal yang lebih rendah daripada tungsten yaitu 1700 derajat celcius hal ini berarti besarnya energi yang dibutuhkan untuk pemanasan pada aplikasi pemakaian logam campuran ini juga lebih rendah.

5. Katoda berlapis oksida (Oxide-Coated Cathode)

Katoda tipe ini terbuat dari lempengan nickel yang dilapis dengan barium dan oksida strontium. Sebagai hasil dari pelapisan tersebut maka dihasilkanlah katoda yang memiliki fungsi kerja yang dan temperature kerja optimal rendah yaitu sekitar 750 derajat celsius. Katoda jenis ini umumnya digunakan untuk aplikasi yang menggunakan tegangan tidak lebih dari 1000 V.

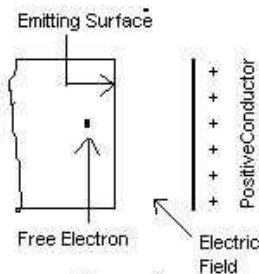


Figure 4

5. Emisi Medan Listrik (Field Emission)

Pada emisi jenis ini yang menjadi penyebab lepasnya elektron dari

bahan ialah adanya gaya tarik medan listrik luar yang diberikan pada bahan. Pada katoda yang digunakan pada proses emisi ini dikenakan medan listrik yang cukup besar sehingga tarikan yang terjadi dari medan listrik pada elektron menyebabkan elektron memiliki energi yang cukup untuk lompat keluar dari permukaan katoda. Emisi medan listrik adalah salah satu emisi utama yang terjadi pada vacuum tube selain emisi thermionic.

6. Emisi Sekunder (Secondary emission)

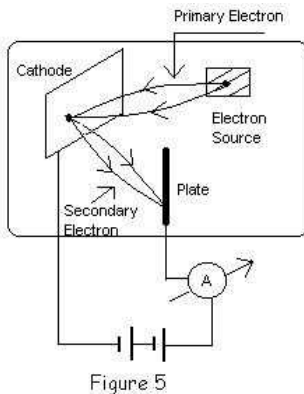


Figure 5

Pada emisi sekunder ini energi yang menjadi penyebab lepasnya elektron datang dalam bentuk energi mekanik yaitu energi yang diberikan dalam proses tumbukan antara elektron luar yang datang dengan elektron yang ada pada katoda. Pada proses tumbukan terjadi pemindahan sebagian energi kinetik dari elektron yang datang ke elektron yang ada pada katoda

sehingga elektron yang ada pada katoda tersebut terpental keluar dari permukaan katoda. Pada kenyataannya proses emisi sekunder tidak dapat berlangsung sukses dengan sendirinya untuk melepaskan elektron dari permukaan akan tetapi proses emisi ini masih membutuhkan dukungan dari emisi jenis lainnya secara bersamaan yaitu emisi medan listrik. Dukungan proses emisi medan listrik dibutuhkan pada proses emisi sekunder, karena walaupun elektron sudah terpental keluar dari permukaan katoda akan tetapi energi yang dimiliki oleh elektron ini seringkali tidak cukup untuk

menjangkau anoda sehingga dibutuhkanlah dukungan energi dari proses emisi medan listrik.

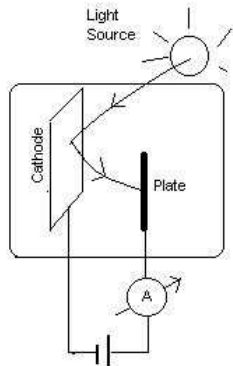


Figure 6

7. Emisi Fotolistrik (Photo Electric Emission)

Pada emisi fotolistrik energi diberikan ke elektron pada katoda melalui foton yaitu paket paket energi cahaya, yang oleh elektron kemudian diubah menjadi energi

mekanik sehingga elektron tersebut dapat terlepas dari permukaan katoda. Sama seperti proses emisi sekunder emisi fotolistrik juga tidak dapat berjalan dengan sempurna tanpa bantuan proses emisi medan listrik, hal ini disebabkan karena energi yang didapat oleh elektron dari foton belum cukup untuk membuat elektron tersebut mampu menjangkau anoda.

Sampai pada bagian ini kita baru saja menyelesaikan obrolan kita mengenai emisi electron dan sekarang obrolan akan kita lanjutkan ke pembahasan mengenai vacuum tube dan cara kerjanya.

Yang dimaksud dengan vacuum tube ialah peralatan elektronik dimana aliran elektron terjadi pada ruang hampa. Ada beberapa jenis vacuum tube yang umum digunakan yaitu

- Dioda
- Trioda

- Tetroda
- Pentoda

REFERENSI

"Elektronika : teori dasar dan penerapannya", jilid 1, Bandung: Penerbit ITB, 1986"

Dioda Hubungan

Hubungan p-n

Lihat gambar diatas

- hubungan berangsur-tangga atau
- hubungan berangsur-linier

Hubungan berangsur-tangga, rapat pencampuran akseptor atau donor dalam semikonduktor tetap sampai mencapai hubungan. Pencampuran dengan pemanasan pada temperature tinggi dlm waktu singkat. Dalam hubungan berangsur-linier, rapat pencampuran berubah secara linier menurut jarak menjauh dari hubungan. Terbentuk dg menarik kristal tunggal dari lelehan germanium yang pd saat dimulai proses sudah berisi pencampuran dari satu jenis.

Hubungan p-n tanpa catu

Lihat gambar atas

Elektron berdifusi lewat hubungan ke kiri dan lobang-lobang berdifusi ke kanan. Setelah melewati hubungan mereka bergabung dg membiarkan ion-ion tidak bergerak disekelilingnya tidak ternetralkan. mereka dinamakan muatan tidak tercakup, yang menghasilkan medan listrik lewat hubungan. Medan ini diarahkan dari sisi n ke sisi p dan dinamakan medan halangan. Medan ini melawan gerakan difusi elektron dan lubang lewat hubungan.

Tebal daerah kosong sekitar 0,5 mikrometer. Karena ada medan halangan lewat hubungan, perpindahan elektron dari sisi n ke sisi p memerlukan sejumlah energi yang dinamakan energi halangan (barrier) (E_b). Potensial halangan ekivalen V_B diberikan oleh $E_b = eV_B$ berdasarkan energi halangan tergantung pada lebar daerah tidak tercakup. Jumlah energinya sama kalau lobang dari daerah p berpindah ke daerah n. Daerah P terdiri dari elektron sbg pembawa minoritas dan daerah n berisi lubang sebagai pembawa minoritas. Medan halangan berperan sehingga elektron dari sisi p dan lubang dari sisi n dg mudah melewati hubungan. Krn itu gerakan pembawa minoritas membentuk aliran arus. Diagram pita energi dari hubungan p-n tanpa dicatu, lihat gambar bawah.

Hubungan p-n yang dicatu

Jika + batere dihub ke sisi jenis p dan – batere ke sisi jenis n. Hubungan akan mengalir arus besar. Dikatakan jenis hubungan p-n dicatu maju (forward biased).

Jika dibalik +batere ke sisi n dan –batere ke sisi p. Hubungan akan mengalir arus kecil. Dikatakan jenis hubungan p-n dicatu balik (reverse biased). Sifat-sifat diatas cocok untuk penyearahan.

Hubungan p-n dicatu maju

Gambar lihat samping kanan

Tegangan catu maju mengakibatkan gaya pada lubang di sisi jenis p dan pada electron di sisi jenis n. Gaya ini mengakibatkan lubang dan electron bergerak menuju hubungan. Akibatnya lebar muatan tidak tercakup berkurang dan halangan berkurang, yakni energi halangannya.gambar samping kiri.

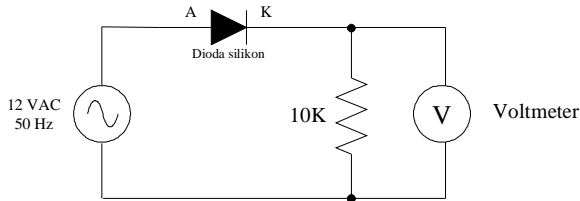
PENYEARAH

1. Pendahuluan

Penggunaan dioda yang paling umum adalah sebagai penyearah . Penyearah adalah suatu rangkaian yang berfungsi untuk mengubah tegangan bolak-balik menjadi tegangan searah. Penyearah dengan dioda mengikuti sifat dioda yang akan menghantar pada satu arah dengan drop tegangan yang kecil yaitu sebesar 0,7 volt.

Ada dua type rangkaian penyearah dengan menggunakan dioda yaitu penyearah gelombang penuh dan penyearah setengah gelombang yang mana kedua rangkaian tersebut akan diuji pada praktikum

2. Penyearah Setengah Gelombang



2.1. Penyearah Setengah Gelombang dengan Kapasitor

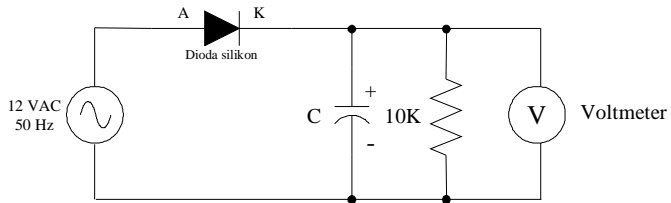
Untuk mendapatkan suatu tegangan DC yang baik dimana bentuk tegangan hasil penyearahan adalah mendekati garis lurus maka tegangan keluaran dari suatu rangkaian penyearah seperti terlihat pada gambar 1.1 dihubungkan dengan suatu kapasitor secara paralel terhadap beban seperti pada gambar 1.2 dimana arus dari keluaran rangkaian penyearah selain akan melewati beban juga akan mengisi kapasitor sehingga pada saat tegangan hasil penyearahan mengalami penurunan maka kapasitor akan membuang muatannya kebeban dan tegangan beban akan tertahan sebelum mencapai nol. Hal ini dapat dijelaskan pada gambar berikut:

Hasil penyearahan yang tidak ideal akan mengakibatkan adanya ripple seperti terlihat pada gambar diatas dimana tegangan ripple yang dihasilkan dapat ditentukan oleh persamaan berikut :

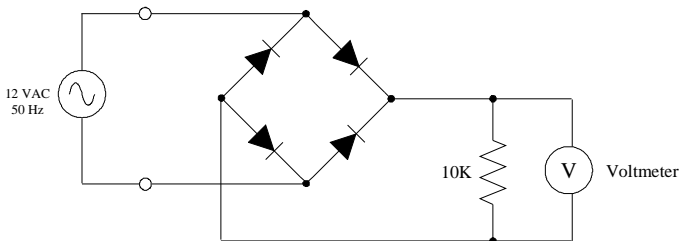
$$\text{Ripple (peak to peak)} = I_{dc} \cdot (T / C)$$

Dimana I_{dc} dalam hal ini adalah tegangan keluaran dibagi dengan R beban. T adalah periode

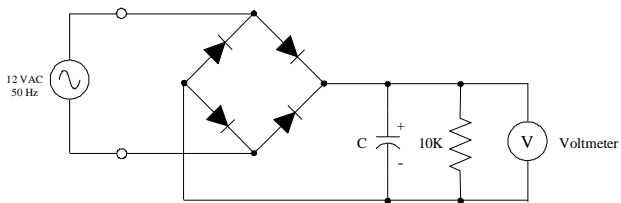
tegangan ripple (detik) dan C adalah nilai kapasitor (Farad) yang digunakan.



3. Penyearah Gelombang Penuh



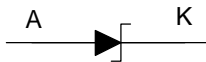
3.1. Penyearah Gelombang Penuh dengan Kapasitor



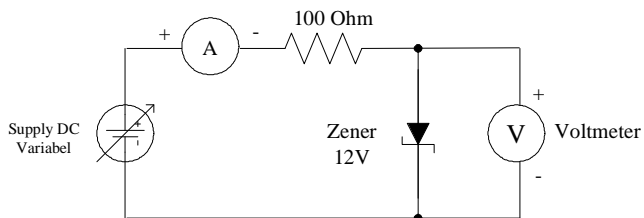
DIODA ZENER

1. Pendahuluan

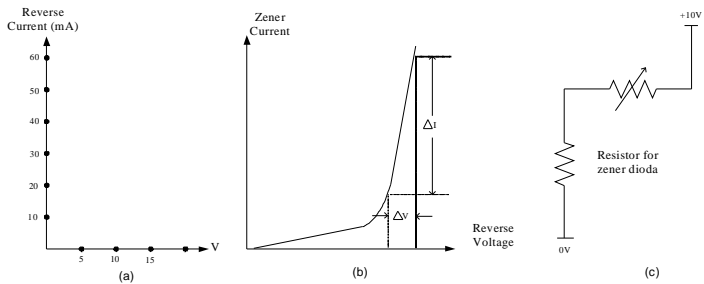
Sebagian dioda semikonduktor bila dihubungkan dengan suatu tegangan balik yang cukup akan melakukan suatu arus balik. Hal ini tidak ditunjukkan sebelumnya karena biasanya akan merusak dioda. Akan tetapi dioda Zener justru adalah suatu dioda yang dirancang untuk bisa melakukan arus balik dengan aman dan dengan drop tegangan hanya beberapa volt saja. Simbol dioda zener adalah seperti pada gambar 2.1 dimana bentuk simbol tersebut menyerupai dioda biasa kecuali garis melintang pada kepala panah yang digunakan untuk menyatakan sudut karakteristik balik. Pada arah maju dioda zener berperilaku seperti dioda biasa.



2. Karakteristik maju dioda Zener



3. Karakteristik balik dioda Zener



Tugas perorangan:

Buat resume tentang

1. konsep elektron, atom, pita energi.
2. konduktor, isolator, semikonduktor
3. semi konduktor murni
4. rekombinasi
5. semikonduktor tidak murni
6. pengaruh temperatur pada semikonduktor
7. efek hall.
8. dioda dan hubungan-hubungannya
9. s.d. hubungan p-n yang dicatu.

Tolong diketik yang rapi dan menarik dijilid. Silahkan ambil dari referensi mana saja dan media apa saja.

Transistor

The transistor, invented by three scientists at the Bell Laboratories in 1947, rapidly replaced the vacuum tube as an electronic signal regulator. A transistor regulates current or voltage flow and acts as a switch or gate for electronic signals. A transistor consists of three layers of a semiconductor material, each capable of carrying a current. A semiconductor is a material such as germanium and silicon that conducts electricity in a "semi-enthusiastic" way. It's somewhere between a real conductor such as copper and an insulator (like the plastic wrapped around wires).

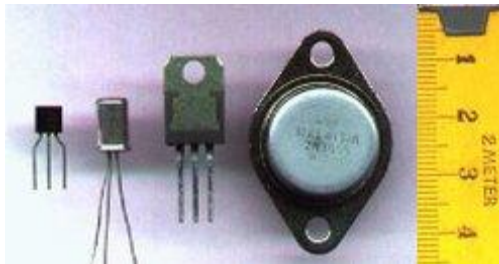
The semiconductor material is given special properties by a chemical process called *doping*. The doping results in a material that either adds extra electrons to the material (which is then called *N-type* for the extra negative charge carriers) or creates "holes" in the material's crystal structure (which is then called *P-type* because it results in more positive charge carriers). The transistor's three-layer structure contains an N-type semiconductor layer sandwiched between P-type layers (a PNP configuration) or a P-type layer between N-type layers (an NPN configuration).

A small change in the current or voltage at the inner semiconductor layer (which acts as the control electrode) produces a large, rapid change in the current passing through the entire component. The component can thus act as a switch, opening and closing an electronic gate many times per second. Today's computers use circuitry made with complementary metal oxide semiconductor ([CMOS](#)) technology. CMOS uses two complementary transistors per gate (one with N-type material; the

other with P-type material). When one transistor is maintaining a logic state, it requires almost no power.

Transistors are the basic elements in integrated circuits (ICs), which consist of very large numbers of transistors interconnected with circuitry and baked into a single silicon [microchip](#) or "chip."

Jenis Transistor



Berbagai macam Transistor (Dibandingkan dengan pita ukur centimeter)

Transistor adalah [alat semikonduktor](#) yang dipakai sebagai penguat, pemotong (switching), stabilisasi tegangan, modulasi sinyal atau fungsi lainnya. Transistor dapat berfungsi semacam kran listrik, dimana berdasarkan arus inputnya (BJT) atau tegangan inputnya (FET), memungkinkan pengaliran listrik yang sangat akurat dari sirkuit sumber listriknya.

Pada umumnya, transistor memiliki 3 terminal. Tegangan atau arus yang dipasang di satu terminalnya mengatur arus yang lebih besar yang melalui 2 terminal lainnya. Transistor adalah komponen yang sangat penting dalam dunia elektronik modern. Dalam rangkaian analog, transistor digunakan dalam amplifier (penguat). Rangkaian analog melingkupi

pengeras suara, sumber listrik stabil, dan penguat sinyal radio. Dalam rangkaian-rangkaian [digital](#), transistor digunakan sebagai [saklar](#) berkecepatan tinggi. Beberapa transistor juga dapat dirangkai sedemikian rupa sehingga berfungsi sebagai logic gate, memori, dan komponen-komponen lainnya.

Cara Kerja Semikonduktor

Pada dasarnya, transistor dan tabung vakum memiliki fungsi yang serupa; keduanya mengatur jumlah aliran arus listrik.

Untuk mengerti cara kerja [semikonduktor](#), misalkan sebuah gelas berisi air murni. Jika sepasang konduktor dimasukan kedalamnya, dan diberikan tegangan DC tepat dibawah tegangan [elektrolisis](#) (sebelum air berubah menjadi [Hidrogen](#) dan [Oksigen](#)), tidak akan ada arus mengalir karena air tidak memiliki pembawa muatan (charge carriers). Sehingga, air murni dianggap sebagai [isolator](#). Jika sedikit garam dapur dimasukan ke dalamnya, konduksi arus akan mulai mengalir, karena sejumlah pembawa muatan bebas (mobile carriers, [ion](#)) terbentuk. Menaikan konsentrasi garam akan meningkatkan konduksi, namun tidak banyak. Garam dapur sendiri adalah non-konduktor ([isolator](#)), karena pembawa muatannya tidak bebas.

[Silikon](#) murni sendiri adalah sebuah isolator, namun jika sedikit pencemar ditambahkan, seperti [Arsenik](#), dengan sebuah proses yang dinamakan doping, dalam jumlah yang cukup kecil sehingga tidak mengacaukan tata letak kristal silikon, Arsenik akan memberikan [elektron](#) bebas dan hasilnya memungkinkan terjadinya konduksi arus listrik. Ini karena Arsenik memiliki 5 atom di orbit terluarnya, sedangkan Silikon hanya 4. Konduksi terjadi karena pembawa muatan bebas telah ditambahkan (oleh kelebihan elektron dari Arsenik). Dalam kasus ini, sebuah Silikon tipe-n (n untuk negatif, karena

pembawa muatannya adalah elektron yang bermuatan negatif) telah terbentuk.

Selain dari itu, Silikon dapat dicampur dengan [Boron](#) untuk membuat semikonduktor tipe-p. Karena Boron hanya memiliki 3 elektron di orbit paling luarnya, pembawa muatan yang baru, dinamakan "lubang" (hole, pembawa muatan positif), akan terbentuk di dalam tata letak kristal silikon.

Dalam tabung hampa, pembawa muatan (elektron) akan dipancarkan oleh [emisi termionik](#) dari sebuah [katode](#) yang dipanaskan oleh kawat filamen. Karena itu, tabung hampa tidak bisa membuat pembawa muatan positif (hole).

Dapat disimak bahwa pembawa muatan yang bermuatan sama akan saling tolak menolak, sehingga tanpa adanya gaya yang lain, pembawa-pembawa muatan ini akan terdistribusi secara merata di dalam materi semikonduktor. Namun di dalam sebuah transistor bipolar (atau diode junction) dimana sebuah semikonduktor tipe-p dan sebuah semikonduktor tipe-n dibuat dalam satu keping Silikon, pembawa-pembawa muatan ini cenderung berpindah ke arah sambungan P-N tersebut (perbatasan antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n), karena tertarik oleh muatan yang berlawanan dari seberangnya.

Kenaikan dari jumlah pencemar (doping level) akan meningkatkan konduktivitas dari materi semikonduktor, asalkan tata-letak kristal Silikon tetap dipertahankan. Dalam sebuah transistor bipolar, daerah terminal emiter memiliki jumlah doping yang lebih besar dibandingkan dengan terminal basis. Rasio perbandingan antara doping emiter dan basis adalah satu dari banyak faktor yang menentukan sifat penguatan arus (current gain) dari transistor tersebut.

Jumlah doping yang diperlukan sebuah semikonduktor adalah sangat kecil, dalam ukuran satu berbanding seratus juta, dan ini menjadi kunci dalam keberhasilan semikonduktor. Dalam sebuah metal, populasi pembawa muatan adalah sangat tinggi; satu

pembawa muatan untuk setiap atom. Dalam metal, untuk merubah metal menjadi isolator, pembawa muatan harus disapu dengan memasang suatu beda tegangan. Dalam metal, tegangan ini sangat tinggi, jauh lebih tinggi dari yang mampu menghancurkannya. Namun, dalam sebuah semikonduktor hanya ada satu pembawa muatan dalam beberapa juta atom. Jumlah tegangan yang diperlukan untuk menyapu pembawa muatan dalam sejumlah besar semikonduktor dapat dicapai dengan mudah. Dengan kata lain, listrik di dalam metal adalah inkompresible (tidak bisa dimampatkan), seperti fluida. Sedangkan dalam semikonduktor, listrik bersifat seperti gas yang bisa dimampatkan. Semikonduktor dengan doping dapat dirubah menjadi isolator, sedangkan metal tidak.

Gambaran di atas menjelaskan konduksi disebabkan oleh pembawa muatan, yaitu elektron atau lubang, namun dasarnya transistor bipolar adalah aksi kegiatan dari pembawa muatan tersebut untuk menyebrangi daerah depletion zone. Depletion zone ini terbentuk karena transistor tersebut diberikan tegangan bias terbalik, oleh tegangan yang diberikan di antara basis dan emiter. Walau transistor terlihat seperti dibentuk oleh dua diode yang disambungkan, sebuah transistor sendiri tidak bisa dibuat dengan menyambungkan dua diode. Untuk membuat transistor, bagian-bagiannya harus dibuat dari sepotong kristal silikon, dengan sebuah daerah basis yang sangat tipis.

Cara Kerja Transistor

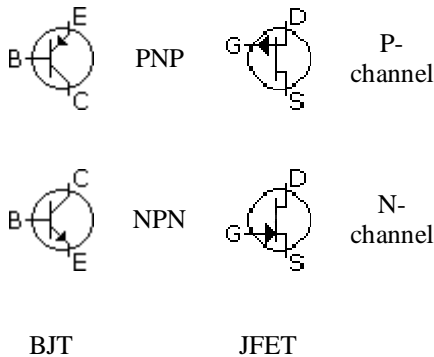
Dari banyak tipe-tipe transistor modern, pada awalnya ada dua tipe dasar transistor, [bipolar junction transistor](#) (BJT atau transistor bipolar) dan [field-effect transistor](#) (FET), yang masing-masing bekerja secara berbeda.

Transistor bipolar dinamakan demikian karena kanal konduksi utamanya menggunakan dua polaritas

pembawa muatan: elektron dan lubang, untuk membawa arus listrik. Dalam BJT, arus listrik utama harus melewati satu daerah/lapisan pembatas dinamakan [depletion zone](#), dan ketebalan lapisan ini dapat diatur dengan kecepatan tinggi dengan tujuan untuk mengatur aliran arus utama tersebut.

FET (juga dinamakan transistor unipolar) hanya menggunakan satu jenis pembawa muatan (elektron atau hole, tergantung dari tipe FET). Dalam FET, arus listrik utama mengalir dalam satu kanal konduksi sempit dengan depletion zone di kedua sisinya (dibandingkan dengan transistor bipolar dimana daerah Basis memotong arah arus listrik utama). Dan ketebalan dari daerah perbatasan ini dapat dirubah dengan perubahan tegangan yang diberikan, untuk merubah ketebalan kanal konduksi tersebut. Lihat artikel untuk masing-masing tipe untuk penjelasan yang lebih lanjut.

Jenis-Jenis Transistor



Simbol Transistor dari Berbagai Tipe

Secara umum, transistor dapat dibeda-bedakan berdasarkan banyak kategori:

- Materi semikonduktor: Germanium, Silikon, Gallium Arsenide
- Kemasan fisik: Through Hole Metal, Through Hole Plastic, Surface Mount, IC, dan lain-lain
- Tipe: UJT, BJT, JFET, IGFET ([MOSFET](#)), IGBT, HBT, MISFET, VMOSFET, MESFET, HEMT, dan lain-lain
- Polaritas: NPN atau N-channel, PNP atau P-channel
- Maximum kapasitas daya: Low Power, Medium Power, High Power
- Maximum frekwensi kerja: Low, Medium, atau High Frequency, RF transistor, Microwave, dan lain-lain
- Aplikasi: Amplifier, Saklar, General Purpose, Audio, Tegangan Tinggi, dan lain-lain

BJT

[BJT](#) (Bipolar Junction Transistor) adalah salah satu dari dua jenis transistor. Cara kerja BJT dapat dibayangkan sebagai dua dioda yang terminal positif atau negatifnya berdempet, sehingga ada tiga terminal. Ketiga terminal tersebut adalah emiter (E), kolektor (C), dan basis (B).

Perubahan arus listrik dalam jumlah kecil pada terminal basis dapat menghasilkan perubahan arus listrik dalam jumlah besar pada terminal kolektor. Prinsip inilah yang mendasari penggunaan transistor sebagai penguat elektronik. Rasio antara arus pada kolektor dengan arus pada basis biasanya dilambangkan dengan β atau h_{FE} . β biasanya berkisar sekitar 100 untuk transistor-transistor BJT.

FET

FET dibagi menjadi dua keluarga: Junction FET ([JFET](#)) dan Insulated Gate FET (IGFET) atau juga dikenal sebagai Metal Oxide Silicon (atau Semiconductor) FET ([MOSFET](#)). Berbeda dengan IGFET, terminal gate dalam JFET membentuk sebuah

[dioda](#) dengan kanal (materi semikonduktor antara Source dan Drain). Secara fungsinya, ini membuat N-channel JFET menjadi sebuah versi solid-state dari tabung vakum, yang juga membentuk sebuah dioda antara [grid](#) dan [katode](#). Dan juga, keduanya (JFET dan tabung vakum) bekerja di "depletion mode", keduanya memiliki impedansi input tinggi, dan keduanya menghantarkan arus listrik dibawah kontrol tegangan input.

FET lebih jauh lagi dibagi menjadi tipe **enhancement mode** dan **depletion mode**. Mode menandakan polaritas dari tegangan gate dibandingkan dengan source saat FET menghantarkan listrik. Jika kita ambil N-channel FET sebagai contoh: dalam depletion mode, gate adalah negatif dibandingkan dengan source, sedangkan dalam enhancement mode, gate adalah positif. Untuk kedua mode, jika tegangan gate dibuat lebih positif, aliran arus di antara source dan drain akan meningkat. Untuk P-channel FET, polaritas-polaritas semua dibalik. Sebagian besar IGFET adalah tipe enhancement mode, dan hampir semua JFET adalah tipe depletion mode.

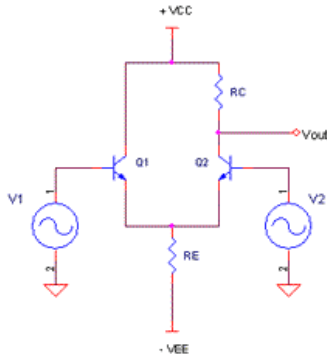
Operational Amplifier

Karakteristik Op-Amp

kalau perlu mendesain sinyal level meter, histeresis pengatur suhu, osilator, pembangkit sinyal, penguat audio, penguat mic, filter aktif semisal tapis nada bass, mixer, konverter sinyal, integrator, differensiator, komparator dan sederet aplikasi lainnya, selalu pilihan yang mudah adalah dengan membolak-balik data komponen yang bernama op-amp. Komponen elektronika analog dalam kemasan IC (*integrated circuits*) ini memang adalah komponen serbaguna dan dipakai pada banyak aplikasi hingga sekarang. Hanya dengan menambah beberapa resistor dan potensiometer, dalam sekejap (atau dua kejam) sebuah pre-amp audio kelas B sudah dapat jadi dirangkai di atas sebuah proto-board.

Penguat diferensial

Op-amp dinamakan juga dengan penguat diferensial (*differential amplifier*). Sesuai dengan istilah ini, op-amp adalah komponen IC yang memiliki 2 input tegangan dan 1 output tegangan, dimana tegangan output-nya adalah proporsional terhadap perbedaan tegangan antara kedua inputnya itu. Penguat diferensial seperti yang ditunjukkan pada gambar-1 merupakan rangkaian dasar dari sebuah op-amp.

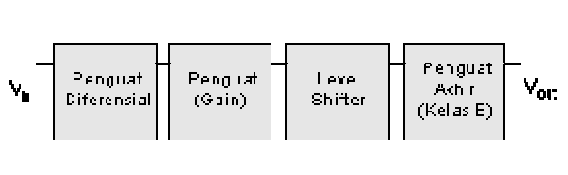


gambar-1 : penguat diferensial

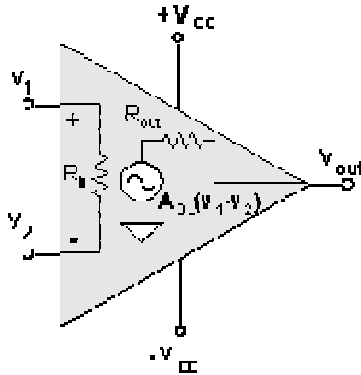
Pada rangkaian yang demikian, persamaan pada titik V_{out} adalah $V_{out} = A(v_1 - v_2)$ dengan A adalah nilai penguatan dari penguat diferensial ini. Titik input v_1 dikatakan sebagai input *non-inverting*, sebab tegangan v_{out} satu phase dengan v_1 . Sedangkan sebaliknya titik v_2 dikatakan input *inverting* sebab berlawanan phase dengan tegangan v_{out} .

Diagram Op-amp

Op-amp di dalamnya terdiri dari beberapa bagian, yang pertama adalah penguat diferensial, lalu ada tahap penguatan (*gain*), selanjutnya ada rangkaian penggeser level (*level shifter*) dan kemudian penguat akhir yang biasanya dibuat dengan penguat *push-pull* kelas B. Gambar-2(a) berikut menunjukkan diagram dari op-amp yang terdiri dari beberapa bagian tersebut.



gambar-2 (a) : Diagram blok Op-Amp



gambar-2 (b) : Diagram schematic simbol Op-Amp

Simbol op-amp adalah seperti pada gambar-2(b) dengan 2 input, *non-inverting* (+) dan input *inverting* (-). Umumnya op-amp bekerja dengan *dual supply* ($+V_{cc}$ dan $-V_{ee}$) namun banyak juga op-amp dibuat dengan *single supply* ($V_{cc} - ground$). Simbol rangkaian di dalam op-amp pada gambar-2(b) adalah parameter umum dari sebuah op-amp. R_{in} adalah resistansi input yang nilai idealnya infinit (tak terhingga). R_{out} adalah resistansi output dan besar resistansi idealnya 0 (nol). Sedangkan A_{OL} adalah nilai penguatan open loop dan nilai idealnya tak terhingga.

Saat ini banyak terdapat tipe-tipe op-amp dengan karakteristik yang spesifik. Op-amp standard type 741 dalam kemasan IC DIP 8 pin sudah dibuat sejak tahun 1960-an. Untuk tipe yang sama, tiap pabrikan mengeluarkan seri IC dengan insial atau nama yang berbeda. Misalnya dikenal MC1741 dari motorola, LM741 buatan National Semiconductor, SN741 dari Texas Instrument dan lain sebagainya. Tergantung dari teknologi pembuatan dan desain IC-nya, karakteristik satu op-amp dapat berbeda dengan op-amp lain. Tabel-1 menunjukkan beberapa parameter op-amp yang penting beserta nilai idealnya dan juga contoh real dari parameter LM714.

| Parameter | Symbol | Op-amp Ideal | LM741 |
|-----------------------------|----------------|--------------|----------------|
| Open loop voltage gain | A_{OL} | Infinite | 100.000 |
| Unity-gain frequency | f_{unity} | Infinite | 1 MHz |
| Input resistance | R_{in} | Infinite | 2 M Ω |
| Output resistance | R_{out} | 0 | 75 Ω |
| Input bias current | $I_{in(bias)}$ | 0 | 80 nA |
| Input offset current | $I_{in(off)}$ | 0 | 20 nA |
| Input offset voltage | $V_{in(off)}$ | 0 | 2 mV |
| Slew rate | S_R | Infinite | 0.5 V/ μ s |
| Common Mode Rejection Ratio | CMMR | Infinite | 90 dB |

tabel-1 : parameter op-amp yang penting

Penguatan Open-loop

Op-amp idealnya memiliki penguatan *open-loop* (A_{OL}) yang tak terhingga. Namun pada prakteknya op-amp semisal LM741 memiliki penguatan yang terhingga kira-kira 100.000 kali. Sebenarnya dengan penguatan yang sebesar ini, sistem penguatan op-amp menjadi tidak stabil. Input diferensial yang amat kecil saja sudah dapat membuat outputnya menjadi saturasi. Pada bab berikutnya akan dibahas bagaimana umpan balik bisa membuat sistem penguatan op-amp menjadi stabil.

Unity-gain frequency

Op-amp ideal mestinya bisa bekerja pada frekuensi berapa saja mulai dari sinyal dc sampai frekuensi giga Herzt. Parameter *unity-gain frequency* menjadi penting jika op-amp digunakan untuk aplikasi dengan frekuensi tertentu. Parameter A_{OL} biasanya adalah penguatan op-amp pada sinyal DC. Response penguatan op-amp menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi sinyal input. Op-amp LM741 misalnya memiliki *unity-gain frequency* sebesar 1 MHz. Ini berarti penguatan op-amp akan menjadi 1 kali pada frekuensi 1 MHz. Jika perlu merancang

aplikasi pada frekuensi tinggi, maka pilihlah op-amp yang memiliki *unity-gain frequency* lebih tinggi.

Slew rate

Di dalam op-amp kadang ditambahkan beberapa kapasitor untuk kompensasi dan mereduksi noise. Namun kapasitor ini menimbulkan kerugian yang menyebabkan response op-amp terhadap sinyal input menjadi lambat. Op-amp ideal memiliki parameter slew-rate yang tak terhingga. Sehingga jika input berupa sinyal kotak, maka outputnya juga kotak. Tetapi karena ketidak idealan op-amp, maka sinyal output dapat berbentuk ekponensial. Sebagai contoh praktis, op-amp LM741 memiliki slew-rate sebesar 0.5V/us. Ini berarti perubahan output op-amp LM741 tidak bisa lebih cepat dari 0.5 volt dalam waktu 1 us.

Parameter CMRR

Ada satu parameter yang dinamakan CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*). Parameter ini cukup penting untuk menunjukkan kinerja op-amp tersebut. Op-amp dasarnya adalah penguat diferensial dan mestinya tegangan input yang dikuatkan hanyalah selisih tegangan antara input v_1 (*non-inverting*) dengan input v_2 (*inverting*). Karena ketidak-idealannya op-amp, maka tegangan persamaan dari kedua input ini ikut juga dikuatkan. Parameter CMRR diartikan sebagai kemampuan op-amp untuk menekan penguatan tegangan ini (*common mode*) sekecil-kecilnya. CMRR didefinisikan dengan rumus $CMRR = A_{DM}/A_{CM}$ yang dinyatakan dengan satuan dB. Contohnya op-amp dengan CMRR = 90 dB, ini artinya penguatan A_{DM} (*differential mode*) adalah kira-kira 30.000 kali dibandingkan penguatan A_{CM} (*common mode*). Kalau CMRR-nya 30 dB, maka artinya perbandingannya kira-kira hanya 30 kali. Kalau

diaplikasikan secara real, misalkan tegangan input $v_1 = 5.05$ volt dan tegangan $v_2 = 5$ volt, maka dalam hal ini tegangan diferensialnya (*differential mode*) = 0.05 volt dan tegangan persamaan-nya (*common mode*) adalah 5 volt. Pembaca dapat mengerti dengan CMRR yang makin besar maka op-amp diharapkan akan dapat menekan penguatan sinyal yang tidak diinginkan (*common mode*) sekecil-kecilnya. Jika kedua pin input dihubung singkat dan diberi tegangan, maka output op-amp mestinya nol. Dengan kata lain, op-amp dengan CMRR yang semakin besar akan semakin baik.

LM714 termasuk jenis op-amp yang sering digunakan dan banyak dijumpai dipasaran. Contoh lain misalnya TL072 dan keluarganya sering digunakan untuk penguat audio. Tipe lain seperti LM139/239/339 adalah opamp yang sering dipakai sebagai komparator. Di pasaran ada banyak tipe op-amp. Cara yang paling baik pada saat mendesain aplikasi dengan op-amp adalah dengan melihat dulu karakteristik op-amp tersebut. Saat ini banyak op-amp yang dilengkapi dengan kemampuan seperti current sensing, current limiter, rangkaian kompensasi temperatur dan lainnya. Ada juga op-amp untuk aplikasi khusus seperti aplikasi frekuensi tinggi, *open collector output*, *high power output* dan lain sebagainya. Data karakteristik op-amp yang lengkap, ya ada di datasheet.

Analisa Rangkaian Op-Amp Populer

Operational Amplifier atau di singkat op-amp merupakan salah satu komponen analog yang populer digunakan dalam berbagai aplikasi rangkaian elektronika. Aplikasi op-amp populer yang paling sering dibuat antara lain adalah rangkaian inverter, non-inverter, integrator dan differensiator. Pada pokok bahasan kali ini akan dipaparkan beberapa aplikasi op-amp yang paling dasar, dimana rangkaian *feedback*

(umpan balik) negatif memegang peranan penting. Secara umum, umpanbalik positif akan menghasilkan osilasi sedangkan umpanbalik negatif menghasilkan penguatan yang dapat terukur.

Op-amp ideal

Op-amp pada dasarnya adalah sebuah *differential amplifier* (penguat diferensial) yang memiliki dua masukan. Input (masukan) op-amp seperti yang telah dimaklumi ada yang dinamakan input inverting dan non-inverting. Op-amp ideal memiliki *open loop gain* (penguatan *loop* terbuka) yang tak terhingga besarnya. Seperti misalnya op-amp LM741 yang sering digunakan oleh banyak praktisi elektronika, memiliki karakteristik tipikal *open loop gain* sebesar $10^4 \sim 10^5$. Penguatan yang sebesar ini membuat op-amp menjadi tidak stabil, dan penguatannya menjadi tidak terukur (*infinite*). Disinilah peran rangkaian *negative feedback* (umpanbalik negatif) diperlukan, sehingga op-amp dapat dirangkai menjadi aplikasi dengan nilai penguatan yang terukur (*finite*). Impedansi input op-amp ideal mestinya adalah tak terhingga, sehingga mestinya arus input pada tiap masukannya adalah 0. Sebagai perbandingan praktis, op-amp LM741 memiliki impedansi input $Z_{in} = 10^6$ Ohm. Nilai impedansi ini masih relatif sangat besar sehingga arus input op-amp LM741 mestinya sangat kecil.

Ada dua aturan penting dalam melakukan analisa rangkaian op-amp berdasarkan karakteristik op-amp ideal. Aturan ini dalam beberapa literatur dinamakan *golden rule*, yaitu :

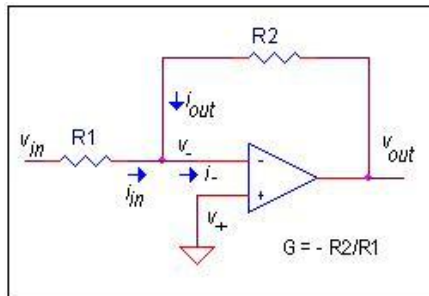
Aturan 1 : Perbedaan tegangan antara input v_+ dan v_- adalah nol ($v_+ - v_- = 0$ atau $v_+ = v_-$)

Aturan 2 : Arus pada input Op-amp adalah nol ($i_+ = i_- = 0$)

Inilah dua aturan penting op-amp ideal yang digunakan untuk menganalisa rangkaian op-amp.

Inverting amplifier

Rangkaian dasar penguat inverting adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 1, dimana sinyal masukannya dibuat melalui input inverting. Seperti tersirat pada namanya, pembaca tentu sudah menduga bahwa fase keluaran dari penguat inverting ini akan selalu berbalikan dengan inputnya. Pada rangkaian ini, umpanbalik negatif dibangun melalui resistor R2.



gambar 1 : penguat inverter

Input non-inverting pada rangkaian ini dihubungkan ke ground, atau $v_+ = 0$. Dengan mengingat dan menimbang aturan 1 (lihat aturan 1), maka akan dipenuhi $v_- = v_+ = 0$. Karena nilainya = 0 namun tidak terhubung langsung ke ground, input op-amp v_- pada rangkaian ini dinamakan *virtual ground*. Dengan fakta ini, dapat dihitung tegangan jepit pada R1 adalah $v_{in} - v_- = v_{in}$ dan tegangan jepit pada reistor R2 adalah $v_{out} - v_- = v_{out}$. Kemudian dengan menggunakan aturan 2, di ketahui bahwa :

$i_{in} + i_{out} = i_- = 0$, karena menurut aturan 2, arus masukan op-amp adalah 0.

$$i_{in} + i_{out} = v_{in}/R_1 + v_{out}/R_2 = 0$$

Selanjutnya

$$v_{out}/R_2 = -v_{in}/R_1 \dots \text{atau}$$

$$v_{out}/v_{in} = -R_2/R_1$$

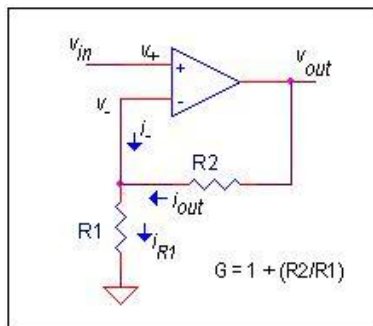
Jika penguatan G didefinisikan sebagai perbandingan tegangan keluaran terhadap tegangan masukan, maka dapat ditulis

$$G = v_{out}/v_{in} = - R_2/R_1 \dots(1)$$

Impedansi rangkaian inverting didefinisikan sebagai impedansi input dari sinyal masukan terhadap ground. Karena input inverting (-) pada rangkaian ini diketahui adalah 0 (*virtual ground*) maka impedansi rangkaian ini tentu saja adalah $Z_{in} = R_1$.

Non-Inverting amplifier

Prinsip utama rangkaian penguat *non-inverting* adalah seperti yang diperlihatkan pada gambar 2 berikut ini. Seperti namanya, penguat ini memiliki masukan yang dibuat melalui input non-inverting. Dengan demikian tegangan keluaran rangkaian ini akan satu fasa dengan tegangan inputnya. Untuk menganalisa rangkaian penguat op-amp non inverting, caranya sama seperti menganalisa rangkaian inverting.



gambar 2 : penguat non-inverter

Dengan menggunakan aturan 1 dan aturan 2, kita uraikan dulu beberapa fakta yang ada, antara lain :

$$V_{in} = V_+$$

$$V_+ = V_- = v_{in} \dots \text{lihat aturan 1.}$$

Dari sini ketahuilah tegangan jepit pada R_2 adalah $v_{out} - v_- = v_{out} - v_{in}$, atau $i_{out} = (v_{out} - v_{in})/R_2$. Lalu tegangan jepit pada R_1 adalah $v_- = v_{in}$, yang berarti arus $i_{R1} = v_{in}/R_1$.

Hukum kirchhoff pada titik input inverting merupakan fakta yang mengatakan bahwa :

$$i_{out} + i_{(-)} = i_{R1}$$

Aturan 2 mengatakan bahwa $i_{(-)} = 0$ dan jika disubstitusikan ke rumus yang sebelumnya, maka diperoleh

$i_{out} = i_{R1}$ dan jika ditulis dengan tegangan jepit masing-masing maka diperoleh

$(v_{out} - v_{in})/R_2 = v_{in}/R_1$ yang kemudian dapat disederhanakan menjadi :

$$v_{out} = v_{in} (1 + R_2/R_1)$$

Jika penguatan G adalah perbandingan tegangan keluaran terhadap tegangan masukan, maka didapat penguatan op-amp non-inverting :

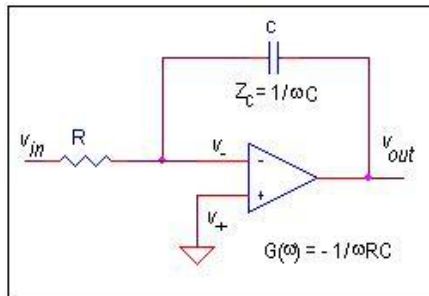
$$G = v_{out}/v_{in} = 1 + (R_2/R_1) \dots (2)$$

Impedansi untuk rangkaian Op-amp non inverting adalah impedansi dari input non-inverting op-amp tersebut. Dari datasheet, LM741 diketahui memiliki impedansi input $Z_{in} = 10^8$ to 10^{12} Ohm.

Integrator

Opamp bisa juga digunakan untuk membuat rangkaian-rangkaian dengan respons frekuensi, misalnya rangkaian penapis (filter). Salah satu contohnya adalah rangkaian integrator seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Rangkaian dasar sebuah integrator adalah rangkaian op-amp inverting, hanya

saja rangkaian umpanbaliknya (*feedback*) bukan resistor melainkan menggunakan kapasitor C.



gambar 3 : integrator

Mari kita coba menganalisa rangkaian ini. Prinsipnya sama dengan menganalisa rangkaian op-amp inverting. Dengan menggunakan 2 aturan op-amp (*golden rule*) maka pada titik inverting akan didapat hubungan matematis :

$$i_{in} = (v_{in} - v_-)/R = v_{in}/R, \text{ dimana } v_- = 0 \text{ (aturan1)}$$

$$i_{out} = -C d(v_{out} - v_-)/dt = -C dv_{out}/dt; v_- = 0$$

$$i_{in} = i_{out}; \text{ (aturan 2)}$$

Maka jika disubstitusikan, akan diperoleh persamaan :

$$i_{in} = i_{out} = v_{in}/R = -C dv_{out}/dt, \text{ atau dengan kata lain}$$

$$V_{out} = -1/RC \left(\int_{t_0}^{t_1} v_{in} dt \right) \dots(3)$$

Dari sinilah nama rangkaian ini diambil, karena secara matematis tegangan keluaran rangkaian ini merupakan fungsi integral dari tegangan input. Sesuai dengan nama penemunya, rangkaian yang demikian dinamakan juga rangkaian **Miller Integral**. Aplikasi yang paling populer menggunakan rangkaian integrator adalah rangkaian pembangkit sinyal segitiga dari inputnya yang berupa sinyal kotak.

Dengan analisa rangkaian integral serta notasi Fourier, dimana

$$f = 1/t \text{ dan}$$

$$\omega = 2\pi f \dots(4)$$

penguatan integrator tersebut dapat disederhanakan dengan rumus

$$G(\omega) = - 1/\omega RC \dots(5)$$

Sebenarnya rumus ini dapat diperoleh dengan cara lain, yaitu dengan mengingat rumus dasar penguatan opamp inverting

$G = - R_2/R_1$. Pada rangkaian integrator (gambar 3) tersebut diketahui

$$R_1 = R$$

$$R_2 = Z_c = 1/\omega C$$

Dengan demikian dapat diperoleh penguatan integrator tersebut seperti persamaan (5) atau agar terlihat respons frekuensinya dapat juga ditulis dengan

$$G(f) = - 1/2\pi f RC \dots(6)$$

Karena respons frekuensinya yang demikian, rangkain integrator ini merupakan dasar dari low pass filter. Terlihat dari rumus tersebut secara matematis, penguatan akan semakin kecil (meredam) jika frekuensi sinyal input semakin besar.

Pada prakteknya, rangkaian *feedback* integrator mesti diparalel dengan sebuah resistor dengan nilai misalnya 10 kali nilai R atau satu besaran tertentu yang diinginkan. Ketika inputnya berupa sinyal dc (frekuensi = 0), kapasitor akan berupa saklar terbuka. Jika tanpa resistor *feedback* seketika itu juga outputnya akan saturasi sebab rangkaian umpanbalik op-amp menjadi open loop (penguatan open loop opamp ideal tidak berhingga atau sangat besar). Nilai resistor *feedback* sebesar 10R akan selalu menjamin

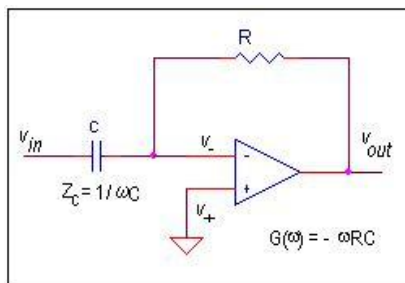
output offset voltage (offset tegangan keluaran) sebesar 10x sampai pada suatu frekuensi *cutoff* tertentu.

Differensiator

Kalau komponen C pada rangkaian penguat inverting di tempatkan di depan, maka akan diperoleh rangkaian differensiator seperti pada gambar 4. Dengan analisa yang sama seperti rangkaian integrator, akan diperoleh persamaan penguatannya :

$$v_{out} = - RC \, dv_{in}/dt \quad \dots(7)$$

Rumus ini secara matematis menunjukkan bahwa tegangan keluaran v_{out} pada rangkaian ini adalah differensiasi dari tegangan input v_{in} . Contoh praktis dari hubungan matematis ini adalah jika tegangan input berupa sinyal segitiga, maka outputnya akan menghasilkan sinyal kotak.



gambar 4 : differensiator

Bentuk rangkain differensiator adalah mirip dengan rangkaian inverting. Sehingga jika berangkat dari rumus penguat inverting

$$G = -R_2/R_1$$

dan pada rangkaian differensiator diketahui :

$$R_2 = R$$

$$R_1 = Z_c = 1/\omega C$$

maka jika besaran ini disubstitusikan akan didapat rumus penguat differensiator

$$G(\omega) = - \omega RC \quad \dots(8)$$

Dari hubungan ini terlihat sistem akan meloloskan frekuensi tinggi (*high pass filter*), dimana besar penguatan berbanding lurus dengan frekuensi. Namun demikian, sistem seperti ini akan menguatkan noise yang umumnya berfrekuensi tinggi. Untuk praktisnya, rangkain ini dibuat dengan penguatan dc sebesar 1 (*unity gain*). Biasanya kapasitor diseri dengan sebuah resistor yang nilainya sama dengan R. Dengan cara ini akan diperoleh penguatan 1 (*unity gain*) pada nilai frekuensi *cutoff* tertentu.

Penutup

Uraian diatas adalah rumusan untuk penguatan opamp ideal. Pada prakteknya ada beberapa hal yang mesti diperhatikan dan ditambahkan pada rangkaian opamp. Antara lain, Tegangan Ofset (*Offset voltage*), Arus Bias (*Bias Current*), Arus offset (*offset current*) dan lain sebagainya. Umumnya ketidak ideal-an op-amp dan bagaimana cara mengatasinya diterangkan pada datasheet opamp dan hal ini spesifik untuk masing-masing pabrikan.

Dari Mikro ke Nano

Orde mikro (m) dalam satuan menunjukkan nilai sepersejuta (10^{-6}). Satu mikrometer (1mm) misalnya, nilainya sama dengan sepersejuta meter (10^{-6} m). Sedang nano (n) menunjukkan nilai seper satu milyar (10^{-9}). Satu nano gram (1 ng) nilainya sama dengan seper satu milyar gram (10^{-9} g). Orde mikro adalah 1000 kali lebih besar dibandingkan orde nano, atau

sebaliknya orde nano adalah seperseribu dari orde mikro.

Kalau dalam dunia elektronika kita mengenal komponen yang disebut mikrochip, berarti di dalam chip elektronik itu terdapat ribuan bahkan jutaan komponen renik berorde mikro. Jika teknologi elektronika kini mulai bergeser dari mikroelektronika ke nanoelektronika, hal ini berarti bahwa komponen-komponen elektronik yang digunakan berorde nano atau setingkat molekuler, bagian terkecil dari suatu materi. Berarti pula seribu kali lebih kecil dibandingkan ukuran komponen yang ada dalam mikrochip saat ini.

Sekitar tahun 1920-an, lahir konsep baru di beberapa pusat penelitian fisika di Heidelberg, Gottingen, dan Kopenhagen. Konsep baru tersebut adalah kuantum mekanika atau kuantum fisika yang semula dipelopori oleh Max Planck dan Albert Einstein, kemudian dilanjutkan oleh ilmuwan seperti Niels Bohr, Schrodinger, Max Born, Samuel A. Goudsmith, Heisenberg dan lain-lain. Konsep ini secara fundamental mengubah prinsip kontinuitas energi menjadi konsep diskrit yang benar-benar mengubah pikiran yang sudah berjalan lebih dari satu abad. Sisi lain yang tak kalah mengejutkan sebagai akibat lahirnya konsep kuantum in adalah lahirnya fisika zat padat oleh F. Seitz dan fisika semikonduktor oleh J. Bardeen di Amerika Serikat, W.B. Sockley di Inggris dan Love di Rusia pada tahun 1940.

Kemajuan riset dalam bidang fisika telah mengantarkan para fisikawan dapat meneliti dan mempelajari berbagai sifat kelistrikan zat padat. Dari penelitian ini telah ditemukan bahan semikonduktor yang mempunyai sifat listrik antara konduktor dan isolator. 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 moderen 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.

Serba Kecil

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). Bentuk dini komputer moderen telah menggunakan elektronika pada rangkaian-rangkaian logika, memori dan sistim angka biner. Komputer yang dibuat oleh J. Presper Eckert dan John W. Mauchly itu diberi nama ABC (Atonosoff-Berry Computer) yang diperkenalkan pada tahun 1942. Komputer ini berukuran sangat besar, sebesar salah satu kamar di rumah kita, karena di dalamnya menggunakan 18 ribu tabung hampa.

Komputer elektronik generasi pertama yang diberi nama ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) dikembangkan pada zaman Perang Dunia Kedua dan dipakai untuk menghitung tabel lintasan

peluru dalam kegiatan militer. Pergeseran penting dalam elektronika telah terjadi pada akhir tahun 1940-an. Fungsi tabung-tabung elektronik saat itu mulai digantikan oleh transistor yang dibuat dari bahan semikonduktor. Penggunaan transistor yang mulai mencuat ke permukaan pada tahun '70-an ternyata memiliki beberapa kelebihan dibandingkan tabung hampa elektronik, antara lain :

- Transistor lebih sederhana sehingga dapat diproduksi dengan biaya lebih rendah.
- Transistor mengkonsumsi daya yang lebih rendah dibandingkan tabung hampa.
- Transistor dapat dioperasikan dalam keadaan dingin sehingga tidak perlu waktu untuk pemanasan.
- Ukuran transistor jauh lebih kecil dibandingkan tabung hampa.
- Daya tahan transistor lebih lama dan dapat mencapai beberapa dasawarsa.
- Transistor mempunyai daya tahan yang tinggi terhadap guncangan dan getaran.

Komputer generasi kedua yang telah menggunakan transistor adalah IBM 1401 yang diluncurkan oleh IBM pada tahun 1959. Sebelumnya juga telah diluncurkan IBM 701 pada tahun 1953 dan IBM 650 pada tahun 1954. Munculnya rangkaian terpadu atau integrated circuit (IC) ternyata telah menggusur dan mengakhiri riwayat keberadaan transistor. Komputer generasi ketiga adalah sistem 360 yang juga diluncurkan oleh IBM. Dalam komputer ini telah menggunakan IC, yang kemudian disusul dengan penggunaan large scale integration (LSI), dan selanjutnya very large scale integration (VLSI). Pada tahun 1971, MITS Inc. meluncurkan ALTAIR, komputer mikro pertama yang menggunakan mikroprosesor Intel 8080. Komputer elektronik generasi berikutnya dikembangkan dengan

menggunakan mikroprosesor yang makin renik sehingga secara fisik tampil dengan ukuran yang lebih kecil, namun dengan kecepatan kerja yang jauh lebih tinggi. Pengaruh kemajuan dalam teknologi elektronika ini demikian pesatnya mengubah wajah teknologi dalam bidang telekomunikasi dan otomatisasi. Kemajuan dalam kedua bidang tersebut menyebabkan kontribusi sains ke dalam teknologi yang sangat besar, hampir mencapai 50 % dalam proses, sehingga teknologi semacam ini disebut High-Technology.

Selain pada komputer, kita juga bisa menyaksikan produk elektronik berupa ponsel yang proses miniaturisasinya seakan tak pernah berhenti, baik dalam aspek desain produknya maupun dalam aspek teknologi mikroelektronikanya. Sebagai anak kandung jagad mikroelektronika, kehadiran ponsel selalu mengikuti perkembangan teknologi mikroelektronika sehingga dapat tampil semakin mungil dan lebih multi fungsi dibandingkan generasi sebelumnya. Mengecilnya ponsel juga didukung oleh kemampuan para ahli dalam mengintegrasikan berbagai komponen baru yang ukurannya lebih kecil seperti mikrochip, yang kemampuannya selalu meningkat seiring dengan perjalanan waktu, dan semakin banyak fungsi yang dapat dijalankannya. Kini ponsel dengan berbagai fasilitas di dalamnya bisa masuk ke dalam genggam tangan.

Beralih ke Nanoteknologi

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. Pada awal tahun '90-an, Dr. Rohrer, penemu tunneling electron microscope dan pemenang hadiah Nobel bidang fisika tahun 1986, meramalkan bahwa mikroelektronika akan segera digantikan oleh nanoelektronika atau

quantum dot. Sedang prof. Petel (president UCLA) meramalkan bahwa teknologi photonik akan menggantikan mikroelektronika di awal abad 21 ini. Feynman pada akhir tahun 1959 juga telah meramalkan akan hadirnya teknologi ini pada abad 21.

Para perintis nanoteknologi, suatu bidang baru teknologi miniatur, telah melihat kemungkinan penggunaan materi seukuran molekul untuk membuat komponen elektronika di masa depan. Dalam teknologi ini, ukuran sirkuit-sirkuit elektronika bisa jadi akan lebih kecil dibandingkan garis tengah potongan rambut atau bahkan seukuran dengan diameter sel darah manusia. Ukuran transistor di masa mendatang akan menjadi sangat kecil berskala atom yang disebut quantum dot.

Suatu ketika di bulan Mei 1988, dalam acara konferensi pengembangan antariksa di Pittsburg, K. Eric Drexler, pakar komputer dari Universitas Stanford, Amerika Serikat, mengemukakan tentang peluang pengembangan nanoteknologi di masa mendatang. Teknologi ini didasarkan pada kemampuan membuat perangkat elektronika dengan ketelitian setingkat ukuran atom. Drexler melihat bahwa makhluk hidup merupakan bukti adanya nanoteknologi. Drexler menguraikan kemungkinan pembuatan alat seukuran molekul yang proses kerjanya menyerupai molekul dari protein yang menjalankan fungsinya di dalam tubuh manusia. Drexler juga meramalkan bahwa zaman nanoteknologi akan dimulai memasuki awal milenium tiga ini.

Dengan beralih ke nanoteknologi ini, tentu saja bidang yang paling banyak dipengaruhi adalah dalam disain komputer. Molekul-molekul akan dihimpun sehingga membentuk komponen elektronika yang mampu menjalankan tugas tertentu. Suatu terobosan besar akan terjadi bila para pakar dapat mewujudkan hal tersebut untuk membuat nanokomputer. Dengan komponen seukuran molekul, nanokomputer dapat

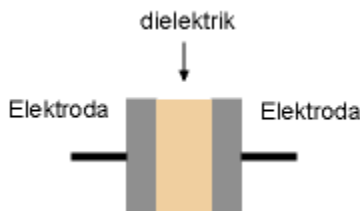
masuk ke dalam kotak seukuran satu mikrometer. Komputer ini mampu bekerja ratusan ribu kali lebih cepat dibandingkan mikrokomputer elektronik yang ada saat ini.

Penelitian yang kini sedang dilakukan oleh para pakar adalah mengembangkan metode penggantian dengan materi protein terhadap molekul, alat memori dan struktur lain yang kini ada di dalam komputer. Jacob Hanker, profesor rekayasa biomedik dari Universitas North Caroline, AS, telah berhasil melakukan percobaan membuat komponen semikonduktor dengan bahan-bahan biologis. Mesin-mesin elektronik yang dinamai juga kuantum elektronik akan memiliki kemampuan mengolah pulsa yang jauh lebih besar. Kuantum teknologi ini akan mampu menerobos keterbatasan dan kejenuhan mikroelektronika yang ada saat ini. Perusahaan komputer IBM saat ini sedang merancang komputer dengan teknologi kuantum yang disebut kuantum komputer. Jika komputer tersebut telah memasuki pasar, maka komputer generasi pendahulu yang masih menggunakan teknologi mikroelektronika bakal tersingkir. Teknologi baru ini bakal segera mengubah sistim jaringan telekomunikasi di awal milenium tiga ini. Teknologi ini juga akan membawa dunia kepada ciri-ciri baru dalam perangkat teknologinya, yaitu : berukuran sangat kecil, berkepadatan tinggi, kecepatan kerjanya tinggi, bermulti fungsi, memiliki kontrol yang serba otomatis, hemat dalam konsumsi energi dan ramah lingkungan.

Kapasitor

Prinsip dasar dan spesifikasi elektriknya

Kapasitor adalah komponen elektronika yang dapat menyimpan muatan listrik. Struktur sebuah kapasitor terbuat dari 2 buah plat metal yang dipisahkan oleh suatu bahan dielektrik. Bahan-bahan dielektrik yang umum dikenal misalnya udara vakum, keramik, gelas dan lain-lain. Jika kedua ujung plat metal diberi tegangan listrik, maka muatan-muatan positif akan mengumpul pada salah satu kaki (elektroda) metalnya dan pada saat yang sama muatan-muatan negatif terkumpul pada ujung metal yang satu lagi. Muatan positif tidak dapat mengalir menuju ujung kutub negatif dan sebaliknya muatan negatif tidak bisa menuju ke ujung kutub positif, karena terpisah oleh bahan dielektrik yang non-konduktif. Muatan elektrik ini "tersimpan" selama tidak ada konduksi pada ujung-ujung kakinya. Di alam bebas, fenomena kapasitor ini terjadi pada saat terkumpulnya muatan-muatan positif dan negatif di awan.



prinsip dasar kapasitor

Kapasitansi

Kapasitansi didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu kapasitor untuk dapat menampung muatan elektron. Coulombs pada abad 18 menghitung bahwa 1 coulomb = 6.25×10^{18} elektron. Kemudian Michael

Faraday membuat postulat bahwa sebuah kapasitor akan memiliki kapasitansi sebesar 1 farad jika dengan tegangan 1 volt dapat memuat muatan elektron sebanyak 1 coulombs. Dengan rumus dapat ditulis :

$$Q = CV \dots\dots\dots(1)$$

Q = muatan elektron dalam C (coulombs)

C = nilai kapasitansi dalam F (farads)

V = besar tegangan dalam V (volt)

Dalam praktek pembuatan kapasitor, kapasitansi dihitung dengan mengetahui luas area plat metal (A), jarak (t) antara kedua plat metal (tebal dielektrik) dan konstanta (k) bahan dielektrik. Dengan rumusan dapat ditulis sebagai berikut :

$$C = (8.85 \times 10^{-12}) (k A/t) \dots(2)$$

Berikut adalah tabel contoh konstanta (k) dari beberapa bahan dielektrik yang disederhanakan.

| | |
|------------------|----------------|
| Udara vakum | k = 1 |
| Aluminium oksida | k = 8 |
| Keramik | k = 100 - 1000 |
| Gelas | k = 8 |
| Polyethylene | k = 3 |

Untuk rangkain elektronik praktis, satuan farads adalah sangat besar sekali. Umumnya kapasitor yang ada di pasar memiliki satuan μF (10^{-6} F), nF (10^{-9} F) dan pF (10^{-12} F). Konversi satuan penting diketahui untuk memudahkan membaca besaran sebuah kapasitor. Misalnya 0.047 μF dapat juga dibaca sebagai 47nF, atau contoh lain 0.1nF sama dengan 100pF.

Tipe Kapasitor

Kapasitor terdiri dari beberapa tipe, tergantung dari bahan dielektriknya. Untuk lebih sederhana dapat dibagi menjadi 3 bagian, yaitu kapasitor electrostatic, electrolytic dan electrochemical.

Kapasitor Electrostatic

Kapasitor electrostatic adalah kelompok kapasitor yang dibuat dengan bahan dielektrik dari keramik, film dan mika. Keramik dan mika adalah bahan yang populer serta murah untuk membuat kapasitor yang kapasitansinya kecil. Tersedia dari besaran pF sampai beberapa uF, yang biasanya untuk aplikasi rangkaian yang berkenaan dengan frekuensi tinggi. Termasuk kelompok bahan dielektrik film adalah bahan-bahan material seperti polyester (polyethylene terephthalate atau dikenal dengan sebutan mylar), polystyrene, polypropylene, polycarbonate, metalized paper dan lainnya.

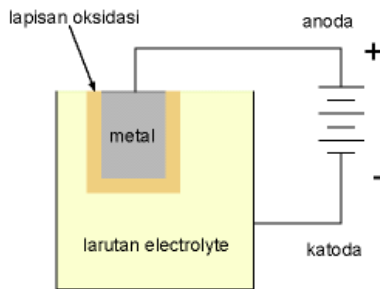
Mylar, MKM, MKT adalah beberapa contoh sebutan merek dagang untuk kapasitor dengan bahan-bahan dielektrik film. Umumnya kapasitor kelompok ini adalah non-polar.

Kapasitor Electrolytic

Kelompok kapasitor electrolytic terdiri dari kapasitor-kapasitor yang bahan dielektriknya adalah lapisan metal-oksida. Umumnya kapasitor yang termasuk kelompok ini adalah kapasitor polar dengan tanda + dan - di badannya. Mengapa kapasitor ini dapat memiliki polaritas, adalah karena proses pembuatannya menggunakan elektrolisa sehingga terbentuk kutub positif anoda dan kutub negatif katoda.

Telah lama diketahui beberapa metal seperti tantalum, aluminium, magnesium, titanium, niobium, zirconium dan seng (zinc) permukaannya dapat dioksidasi sehingga membentuk lapisan metal-oksida

(oxide film). Lapisan oksidasi ini terbentuk melalui proses elektrolisa, seperti pada proses penyepuhan emas. Elektroda metal yang dicelup kedalam larutan electrolit (sodium borate) lalu diberi tegangan positif (anoda) dan larutan electrolit diberi tegangan negatif (katoda). Oksigen pada larutan electrolyte terlepas dan mengoksidai permukaan plat metal. Contohnya, jika digunakan Aluminium, maka akan terbentuk lapisan Aluminium-oksida (Al_2O_3) pada permukaannya.



Kapasitor Elco

Dengan demikian berturut-turut plat metal (anoda), lapisan-metal-oksida dan electrolyte(katoda) membentuk kapasitor. Dalam hal ini lapisan-metal-oksida sebagai dielektrik. Dari rumus (2) diketahui besar kapasitansi berbanding terbalik dengan tebal dielektrik. Lapisan metal-oksida ini sangat tipis, sehingga dengan demikian dapat dibuat kapasitor yang kapasitansinya cukup besar.

Karena alasan ekonomis dan praktis, umumnya bahan metal yang banyak digunakan adalah aluminium dan tantalum. Bahan yang paling banyak dan murah adalah Aluminium. Untuk mendapatkan permukaan yang luas, bahan plat Aluminium ini biasanya digulung radial. Sehingga dengan cara itu

dapat diperoleh kapasitor yang kapasitansinya besar. Sebagai contoh 100uF, 470uF, 4700uF dan lain-lain, yang sering juga disebut kapasitor *elco*.

Bahan electrolyte pada kapasitor Tantalum ada yang cair tetapi ada juga yang padat. Disebut electrolyte padat, tetapi sebenarnya bukan larutan elektrolit yang menjadi elektroda negatif-nya, melainkan bahan lain yaitu manganese-dioksida. Dengan demikian kapasitor jenis ini bisa memiliki kapasitansi yang besar namun menjadi lebih ramping dan mungil. Selain itu karena seluruhnya padat, maka waktu kerjanya (lifetime) menjadi lebih tahan lama. Kapasitor tipe ini juga memiliki arus bocor yang sangat kecil Jadi dapat dipahami mengapa kapasitor Tantalum menjadi relatif mahal.

Kapasitor Electrochemical

Satu jenis kapasitor lain adalah kapasitor electrochemical. Termasuk kapasitor jenis ini adalah batere dan accu. Pada kenyataanya batere dan accu adalah kapasitor yang sangat baik, karena memiliki kapasitansi yang besar dan arus bocor (leakage current) yang sangat kecil. Tipe kapasitor jenis ini juga masih dalam pengembangan untuk mendapatkan kapasitansi yang besar namun kecil dan ringan, misalnya untuk aplikasi mobil elektrik dan telepon selular.

Membaca Kapasitansi

Pada kapasitor yang berukuran besar, nilai kapasitansi umumnya ditulis dengan angka yang jelas. Lengkap dengan nilai tegangan maksimum dan polaritasnya. Misalnya pada kapasitor elco dengan jelas tertulis kapasitansinya sebesar 22uF/25v.

Kapasitor yang ukuran fisiknya mungil dan kecil biasanya hanya bertuliskan 2 (dua) atau 3 (tiga) angka saja. Jika hanya ada dua angka satuannya adalah *pF* (*pico farads*). Sebagai contoh, kapasitor

yang bertuliskan dua angka 47, maka kapasitansi kapasitor tersebut adalah 47 pF.

Jika ada 3 digit, angka pertama dan kedua menunjukkan nilai nominal, sedangkan angka ke-3 adalah faktor pengali. Faktor pengali sesuai dengan angka nominalnya, berturut-turut 1 = 10, 2 = 100, 3 = 1.000, 4 = 10.000 dan seterusnya. Misalnya pada kapasitor keramik tertulis 104, maka kapasitansinya adalah $10 \times 10.000 = 100.000\text{pF}$ atau $= 100\text{nF}$. Contoh lain misalnya tertulis 222, artinya kapasitansi kapasitor tersebut adalah $22 \times 100 = 2200 \text{ pF} = 2.2 \text{ nF}$.

Selain dari kapasitansi ada beberapa karakteristik penting lainnya yang perlu diperhatikan. Biasanya spesifikasi karakteristik ini disajikan oleh pabrik pembuat didalam *datasheet*. Berikut ini adalah beberapa spesifikasi penting tersebut.

Tegangan Kerja (working voltage)

Tegangan kerja adalah tegangan maksimum yang diijinkan sehingga kapasitor masih dapat bekerja dengan baik. Para elektro- mania barangkali pernah mengalami kapasitor yang meledak karena kelebihan tegangan. Misalnya kapasitor 10uF 25V, maka tegangan yang bisa diberikan tidak boleh melebihi 25 volt dc. Umumnya kapasitor-kapasitor polar bekerja pada tegangan DC dan kapasitor non-polar bekerja pada tegangan AC.

Temperatur Kerja

Kapasitor masih memenuhi spesifikasinya jika bekerja pada suhu yang sesuai. Pabrik pembuat kapasitor umumnya membuat kapasitor yang mengacu pada standar populer. Ada 4 standar populer yang biasanya tertera di badan kapasitor seperti C0G (*ultra stable*), X7R (*stable*) serta Z5U dan Y5V (*general purpose*). Secara lengkap kode-kode tersebut disajikan pada table berikut.

Kode karakteristik kapasitor kelas I

| Koefisien Suhu | | Faktor Pengali Koefisien Suhu | | Toleransi Koefisien Suhu | |
|----------------|------------|-------------------------------|---------|--------------------------|------------|
| Simbol | PPM per C° | Simbol | Pengali | Simbol | PPM per C° |
| C | 0.0 | 0 | -1 | G | +/-30 |
| B | 0.3 | 1 | -10 | H | +/-60 |
| A | 0.9 | 2 | -100 | J | +/-120 |
| M | 1.0 | 3 | -1000 | K | +/-250 |
| P | 1.5 | 4 | -10000 | L | +/-500 |

ppm = part per million

Kode karakteristik kapasitor kelas II dan III

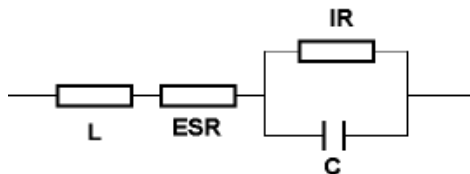
| suhu kerja minimum | | suhu kerja maksimum | | Toleransi Kapasitansi | |
|--------------------|-----|---------------------|------|-----------------------|--------------|
| Simbol | C° | Simbol | C° | Simbol | Persen |
| Z | +10 | 2 | +45 | A | +/- 1.0% |
| Y | -30 | 4 | +65 | B | +/- 1.5% |
| X | -55 | 5 | +85 | C | +/- 2.2% |
| | | 6 | +105 | D | +/- 3.3% |
| | | 7 | +125 | E | +/- 4.7% |
| | | 8 | +150 | F | +/- 7.5% |
| | | 9 | +200 | P | +/- 10.0% |
| | | | | R | +/- 15.0% |
| | | | | S | +/- 22.0% |
| | | | | T | +22% / - 33% |
| | | | | U | +22% / - 56% |
| | | | | V | +22% / - 82% |

Toleransi

Seperti komponen lainnya, besar kapasitansi nominal ada toleransinya. Tabel diatas menyajikan nilai toleransi dengan kode-kode angka atau huruf tertentu. Dengan table di atas pemakai dapat dengan mudah mengetahui toleransi kapasitor yang biasanya tertera menyertai nilai nominal kapasitor. Misalnya jika tertulis 104 X7R, maka kapasitansinya adalah 100nF dengan toleransi +/-15%. Sekaligus dikethau juga bahwa suhu kerja yang direkomendasikan adalah antara -55C° sampai $+125\text{C}^{\circ}$ (lihat tabel kode karakteristik)

Insulation Resistance (IR)

Walaupun bahan dielektrik merupakan bahan yang non-konduktor, namun tetap saja ada arus yang dapat melewatinya. Artinya, bahan dielektrik juga memiliki resistansi. walaupun nilainya sangat besar sekali. Phenomena ini dinamakan arus bocor DCL (DC Leakage Current) dan resistansi dielektrik ini dinamakan Insulation Resistance (IR). Untuk menjelaskan ini, berikut adalah model rangkaian kapasitor.



model kapasitor

C = Capacitance

ESR = Equivalent Series Resistance

L = Inductance

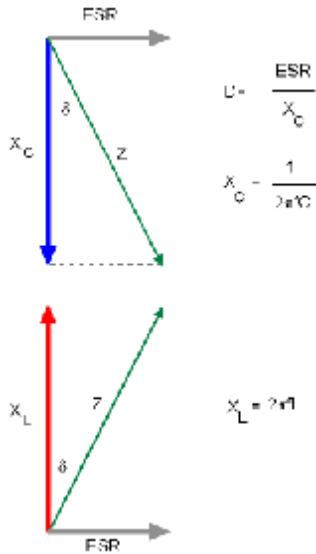
IR = Insulation Resistance

Jika tidak diberi beban, semestinya kapasitor dapat menyimpan muatan selama-lamanya. Namun dari

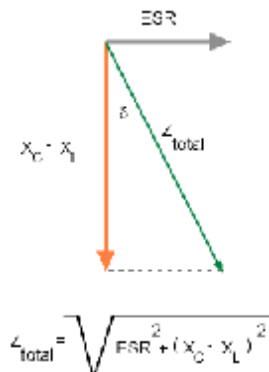
model di atas, diketahui ada resistansi dielektrik IR (Insulation Resistance) yang paralel terhadap kapasitor. Insulation resistance (IR) ini sangat besar ($MOhm$). Konsekuensinya tentu saja arus bocor (DCL) sangat kecil (μA). Untuk mendapatkan kapasitansi yang besar diperlukan permukaan elektroda yang luas, tetapi ini akan menyebabkan resistansi dielektrik makin kecil. Karena besar IR selalu berbanding terbalik dengan kapasitansi (C), karakteristik resistansi dielektrik ini biasa juga disajikan dengan besaran RC ($IR \times C$) yang satuannya *ohm-farads* atau *megaohm-micro farads*.

Dissipation Factor (DF) dan Impedansi (Z)

Dissipation Factor adalah besar persentasi rugi-rugi (*losses*) kapasitansi jika kapasitor bekerja pada aplikasi frekuensi. Besaran ini menjadi faktor yang diperhitungkan misalnya pada aplikasi motor fasa, rangkaian *ballast*, *tuner* dan lain-lain. Dari model rangkaian kapasitor digambarkan adanya resistansi seri (ESR) dan induktansi (L). Pabrik pembuat biasanya meyertakan data DF dalam persen. Rugi-rugi (*losses*) itu didefenisikan sebagai ESR yang besarnya adalah persentasi dari impedansi kapasitor X_c . Secara matematis di tulis sebagai berikut :



Dari penjelasan di atas dapat dihitung besar total impedansi (Z total) kapasitor adalah :



Karakteristik respons frekuensi sangat perlu diperhitungkan terutama jika kapasitor bekerja pada frekuensi tinggi. Untuk perhitungan-perhitungan respons frekuensi dikenal juga satuan faktor kualitas Q (*quality factor*) yang tak lain sama dengan 1/DF.

Metal Oxide Silicon Capacitance

1. Introduction

Capacitance voltage measurements of MOS capacitor structure provide a wealth of information about the structure which is of direct interest when one evaluates an MOS process. Since the MOS structure is simple to fabricate the technique is widely used.

To understand capacitance-voltage measurements one must first be familiar with the frequency dependence of the measurement. This frequency dependence occurs primarily in inversion since a certain time is needed to generate the minority carriers in the inversion layer. Thermal equilibrium is therefore not obtained immediately.

The **low frequency** or quasi-static measurement maintains thermal equilibrium at all times. This capacitance is the difference in charge divided by the difference in gate voltage while the capacitor is in equilibrium at each voltage. A typical measurement is performed with an electrometer which measured the charge added per unit time as one slowly varies the applied gate voltage.

The **high frequency** capacitance is obtained from a small signal capacitance measurement at high frequency. The gate voltage is varied slowly to obtain the capacitance versus voltage. Under such conditions one finds that the charge in the inversion layer does not change from the equilibrium value corresponding to the applied DC voltage. The high frequency capacitance therefore reflects the charge variation in the depletion layer and the (rather small) movement of the inversion layer charge.

In this section we first derive the [simple capacitance model](#) which is based on the full depletion approximations and our basic assumption. The comparison with the exact low frequency capacitance

reveals that the largest error occurs at the flatband voltage. We therefore derive the [exact flatband capacitance](#) using the linearized Poisson's equation. Then we discuss the full [exact analysis](#) followed by a discussion of [deep depletion](#) as well as the [non-ideal effects](#) in MOS capacitors.

2. Simple capacitance model

The capacitance of an MOS capacitor is obtained using the same assumptions as in the analysis in section [6.5](#). The MOS structure is treated as consisting of a series connection of two capacitors: the capacitance of the oxide and the capacitance of the depletion layer.

In accumulation there is no depletion layer. The remaining capacitor is the oxide capacitance, so that the capacitance equals:

$$C_{LF} = C_{HF} = C_{ox}, \text{ for } V_G \leq V_{FB} \quad (\text{mc11})$$

In depletion the MOS capacitance is obtained from the series connection of the oxide capacitance and the capacitance of the depletion layer, or:

$$C_{LF} = C_{HF} = \frac{1}{\frac{1}{C_{ox}} + \frac{x_d}{\epsilon_s}}, \text{ for } V_{FB} < V_G < V_T \quad (\text{mc12})$$

where x_d is the variable depletion layer width which is calculated from:

$$x_d = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \phi_s}{q N_a}}, \text{ for } 0 \leq \phi_s \leq 2 \phi_F \quad (\text{mc2})$$

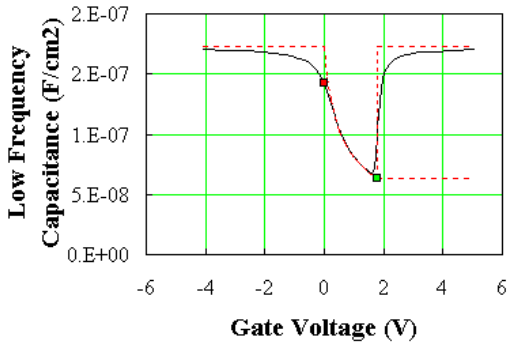
In order to find the capacitance corresponding to a specific value of the gate voltage we also need to use the relation between the potential across the depletion region and the gate voltage, given by:

$$V_G = V_{FB} + \phi_s + \frac{\sqrt{2 \epsilon_s q N_a \phi_s}}{C_{ox}}, \text{ for } 0 \leq \phi_s \leq 2 \phi_F \quad (\text{mc8})$$

In inversion the capacitance becomes independent of the gate voltage. The low frequency capacitance equals the oxide capacitance since charge is added to and from the inversion layer in a low frequency measurement. The high frequency capacitance is obtained from the series connection of the oxide capacitance and the capacitance of the depletion layer having its maximum width, $x_{d,max}$. The capacitances are given by:

$$C_{L,0} = C_{ox} \text{ and } C_{H,0} = \frac{1}{\frac{1}{C_{ox}} + \frac{x_{d,max}}{\epsilon_s}} \text{ for } V_{GS} \geq V_T \quad (\text{mc13})$$

The capacitance of an MOS capacitor as calculated using the simple model is shown in the figure below. The dotted lines represent the simple model while the solid line corresponds to the low frequency capacitance as obtained from the [exact analysis](#).



mosexact.xls - moslfcap.gif

Fig. 6.6.1 Low frequency capacitance of an MOS capacitor. Shown are the exact solution for the low frequency capacitance (solid line) and the low and high frequency capacitance obtained with the simple model (dotted lines). The red square indicates the flatband voltage and capacitance, while the green square indicates the threshold voltage and capacitance. $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ and $t_{ox} = 20 \text{ nm}$.

3. Flat band capacitance

The simple model predicts that the flatband capacitance equals the oxide capacitance. However, the comparison with the exact solution of the low frequency capacitance as shown in the above figure reveals that the error can be substantial. The reason for this is that we have ignored any charge variation in the semiconductor. We will therefore now derive the exact flatband capacitance.

To derive the flatband capacitance including the charge variation in the semiconductor we first linearize Poisson's equation. Since the potential across the semiconductor at flatband is zero, we expect the potential to be small as we vary the gate voltage around the flatband voltage. Poisson's equation can then be simplified to:

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_s} (N_A^+ - p) = \frac{qN_A}{\epsilon_s} \left(1 - e^{-\frac{\phi}{V_T}}\right) \approx \frac{qN_A}{\epsilon_s} \frac{\phi}{V_T} \quad (\text{mc16})$$

The solution to this equation is:

$$\phi = \phi_s e^{-\frac{x}{L_D}}, \quad \text{with } L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s V_T}{qN_A}} \quad (\text{mc17})$$

where L_D is called the Debye length. The solution of the potential enables the derivation of the capacitance of the semiconductor under flatband conditions, or:

$$C_{s,FB} = \frac{dQ_s}{d\phi_s} = \frac{d\left(\epsilon_s \frac{\phi_s}{L_D}\right)}{d\phi_s} = \frac{\epsilon_s}{L_D} \quad (\text{mc18})$$

The flatband capacitance of the MOS structure at flatband is obtained by calculating the series connection of the oxide capacitance and the capacitance of the semiconductor, yielding:

$$C_{FB} = \frac{1}{\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{\epsilon_s}} \quad (\text{mc19})$$

4. Exact analysis

For a description of the derivation of the MOS capacitance using the exact analysis we refer the reader to that [section](#).

5. Deep depletion capacitance

Deep depletion occurs in an MOS capacitor when measuring the high-frequency capacitance while sweeping the gate voltage "quickly". Quickly here means that the gate voltage must be changed fast enough so that the structure is not in thermal equilibrium. One then observes that when ramping the voltage from flatband to threshold and beyond the inversion layer is not or only partially formed as the generation of minority carriers can not keep up with the amount needed to form the inversion layer. The depletion layer therefore keeps increasing beyond its maximum thermal equilibrium value, $x_{d,T}$ resulting in a capacitance which further decreases with voltage.

The time required to reach thermal equilibrium when abruptly biasing the MOS capacitor at a voltage larger than the threshold voltage can be estimated by taking the ratio of the total charge in the inversion layer to the thermal generation rate of minority carriers. A complete analysis should include both a surface generation rate as well as generation in the depletion layer and the quasi-neutral region. A good approximation is obtained by considering only the generation rate in the depletion region $x_{d,dd}$. This yields the following equation:

$$\text{time} \frac{Q_{inv}}{q(G_s + \int G(x) dx)} \approx \frac{C_{ox}(V_G - V_T)}{q \frac{n_i}{2\tau} x_{d,dd}} \quad (\text{mc14})$$

where the generation in the depletion layer was assumed to be constant. The rate of change required to observe deep depletion is then obtained from:

$$\frac{dV_G}{dt} = \frac{q n_i^2 d_d}{2 \tau C_{ox}} \quad (\text{mc15})$$

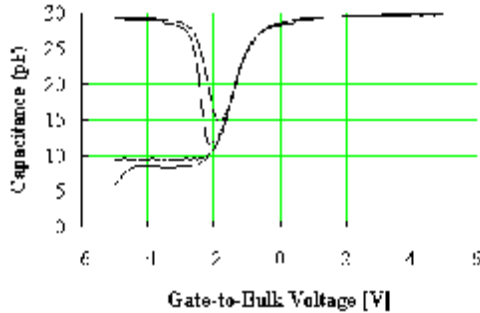
This equation enables to predict that deep depletion is less likely at higher ambient temperature since the intrinsic concentration n_i increases exponentially with temperature, while it is more likely to occur in MOS structures made with wide bandgap materials (for instance SiC for which $E_g = 3$ eV) as the intrinsic concentration decreases exponentially with the value of the energy bandgap.

In silicon MOS structures one finds that the occurrence of deep depletion can be linked to the minority carrier lifetime: while structures with a long (0.1 ms) lifetime require a few seconds to reach thermal equilibrium which results in a pronounced deep depletion effect at room temperature, structures with a short (1 ms) lifetime do not show this effect.

Carrier generation due to light will increase the generation rate beyond the thermal generation rate which we assumed above and reduce the time needed to reach equilibrium. Deep depletion measurements are therefore done in the dark.

6. Experimental results and comparison with theory

As an example we show below the measured low frequency (quasi-static) and high frequency capacitance-voltage curves of an MOS capacitor. The capacitance was measured in the presence of ambient light as well as in the dark as explained in the figure caption.



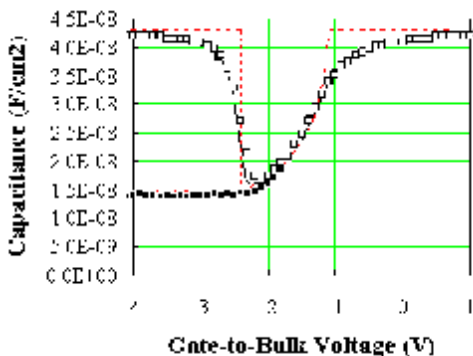
cv1.gif

Fig. 6.6.2 *Low frequency (quasi-static) and high frequency capacitance of an MOS capacitor. Shown are, from top to bottom, the low frequency capacitance measured in the presence of ambient light (top curve), the low frequency capacitance measured in the dark, the high frequency capacitance measured in the presence of ambient light and the high frequency capacitance measured in the dark (bottom curve). All curves were measured from left to right. The MOS parameters are $N_a = 4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $t_{ox} = 80 \text{ nm}$. The device area is 0.0007 cm^2*

The figure illustrates some of the issues when measuring the capacitance of an MOS capacitor. First of all one should measure the devices in the dark; the presence of light causes carrier generation in the capacitor which affects the measured capacitance. In addition one must avoid the deep depletion effects such as the initial linearly varying capacitance of the high frequency capacitance measured in the dark on the above figure (bottom curve). The larger the carrier lifetime, the slower the voltage is to be changed to avoid deep depletion.

The low frequency measured is compared to the theoretical value in the figure below. The high frequency capacitance measured in the presence of light is also

shown on the figure. The figure illustrates the agreement between experiment and theory. A comparison of the experimental low (rather than high) frequency capacitance with theory is somewhat easier to carry out since the theoretical expression is easier to calculate while the low frequency measurement tends to be less sensitive to deep depletion effects.



cv2.gif

Fig. 6.6.3 Comparison of the theoretical low frequency capacitance (solid line) and the experimental data (open squares) obtained in the dark. Also shown is the high frequency measurement in the presence of light of the MOS capacitor (filled squares) and the low and high frequency capacitance obtained with the simple model (dotted lines). Fitting parameters are $N_a = 3.95 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $t_{ox} = 80 \text{ nm}$.

7. Non-Ideal effects in MOS capacitors

Non-ideal effects in MOS capacitors include fixed charge, mobile charge and charge in surface states. All three types of charge can be identified by performing a capacitance-voltage measurement.

Fixed charge in the oxide simply shifts the measured curve. A positive fixed charge at the oxide-

semiconductor interface shifts the flatband voltage by an amount which equals the charge divided by the oxide capacitance. The shift reduces linearly as one reduces the position of the charge relative to the gate electrode and becomes zero if the charge is located at the metal-oxide interface. A fixed charge is caused by ions which are incorporated in the oxide during growth or deposition.

The flatband voltage shift due to mobile charge is described by the same equation as that due to fixed charge. However the measured curves differ since a positive gate voltage causes mobile charge to move away from the gate electrode, while a negative voltage attracts the charge towards the gate. This causes the curve to shift towards the applied voltage. One can recognize mobile charge by the hysteresis in the high frequency capacitance curve when sweeping the gate voltage back and forth. Sodium ions incorporated in the oxide of silicon MOS capacitors are known to yield mobile charge. It is because of the high sensitivity of MOS structures to a variety of impurities that the industry carefully controls the purity of the water and the chemicals used.

Charge due to electrons occupying surface states also yields a shift in flatband voltage. However as the applied voltage is varied, the fermi energy at the oxide-semiconductor interface changes also and affects the occupancy of the surface states. The interface states cause the transition in the capacitance measurement to be less abrupt. The combination of the low frequency and high frequency capacitance allows to calculate the surface state density. This method provides the surface state density over a limited (but highly relevant) range of energies within the bandgap. Measurements on n-type and p-type capacitors at different temperatures provide the surface state density throughout the bandgap.

Resistor

Pada dasarnya semua bahan memiliki sifat resistif namun beberapa bahan seperti tembaga, perak, emas dan bahan metal umumnya memiliki resistansi yang sangat kecil.

Bahan-bahan tersebut menghantar arus listrik dengan baik, sehingga dinamakan konduktor. Kebalikan dari bahan yang konduktif, bahan material seperti karet, gelas, karbon memiliki resistansi yang lebih besar menahan aliran elektron dan disebut sebagai insulator.

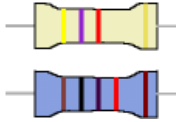
Bagaimana prinsip konduksi, dijelaskan pada artikel tentang semikonduktor.

Resistor adalah komponen dasar elektronika yang digunakan untuk membatasi jumlah arus yang mengalir dalam satu rangkaian. Sesuai dengan namanya resistor bersifat resistif dan umumnya terbuat dari bahan karbon .

Dari hukum Ohms diketahui, resistansi berbanding terbalik dengan jumlah arus yang mengalir melaluinya. Satuan resistansi dari suatu resistor disebut Ohm atau dilambangkan dengan simbol (Ω).

Tipe resistor yang umum adalah berbentuk tabung dengan dua kaki tembaga di kiri dan kanan. Pada badannya terdapat lingkaran membentuk gelang kode warna untuk memudahkan pemakai mengenali besar resistansi tanpa mengukur besarnya dengan Ohmmeter.

Kode warna tersebut adalah standar manufaktur yang dikeluarkan oleh EIA (Electronic Industries Association) seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut. Waktu penulis masuk pendaftaran kuliah elektro, ada satu test yang harus dipenuhi yaitu diharuskan tidak buta warna. Belakangan baru diketahui bahwa mahasiswa elektro wajib untuk bisa membaca warna gelang resistor (barangkali).



| Warna | Nilai | faktor pengali | Toleransi |
|-------------|-------|-----------------|-----------|
| Hitam | 0 | 1 | |
| Coklat | 1 | 10 | 1% |
| Merah | 2 | 100 | 2% |
| Jingga | 3 | 1.000 | |
| Kuning | 4 | 10.000 | |
| Hijau | 5 | 100.000 | |
| Biru | 6 | 10 ⁶ | |
| Violet | 7 | 10 ⁷ | |
| Abu-abu | 8 | 10 ⁸ | |
| Putih | 9 | 10 ⁹ | |
| Emas | - | 0.1 | 5% |
| Perak | - | 0.01 | 10% |
| Tanpa warna | - | - | 20% |

Tabel - 1 : nilai warna gelang

Resistansi dibaca dari warna gelang yang paling depan ke arah gelang toleransi berwarna coklat, merah, emas atau perak. Biasanya warna gelang toleransi ini berada pada badan resistor yang paling pojok atau juga dengan lebar yang lebih menonjol, sedangkan warna gelang yang pertama agak sedikit ke dalam.

Dengan demikian pemakai sudah langsung mengetahui berapa toleransi dari resistor tersebut. Kalau anda telah bisa menentukan mana gelang yang pertama selanjutnya adalah membaca nilai resistansinya.

Jumlah gelang yang melingkar pada resistor umumnya sesuai dengan besar toleransinya. Biasanya

resistor dengan toleransi 5%, 10% atau 20% memiliki 3 gelang (tidak termasuk gelang toleransi). Tetapi resistor dengan toleransi 1% atau 2% (toleransi kecil) memiliki 4 gelang (tidak termasuk gelang toleransi). Gelang pertama dan seterusnya berturut-turut menunjukkan besar nilai satuan, dan gelang terakhir adalah faktor pengalinya.

Misalnya resistor dengan gelang kuning, violet, merah dan emas. Gelang berwarna emas adalah gelang toleransi. Dengan demikian urutan warna gelang resistor ini adalah, gelang pertama berwarna kuning, gelang kedua berwarna violet dan gelang ke tiga berwarna merah.

Gelang ke empat tentu saja yang berwarna emas dan ini adalah gelang toleransi. Dari tabel-1 diketahui jika gelang toleransi berwarna emas, berarti resistor ini memiliki toleransi 5%. Nilai resistansinya dihitung sesuai dengan urutan warnanya.

Pertama yang dilakukan adalah menentukan nilai satuan dari resistor ini. Karena resistor ini resistor 5% (yang biasanya memiliki tiga gelang selain gelang toleransi), maka nilai satuannya ditentukan oleh gelang pertama dan gelang kedua. Masih dari tabel-1 diketahui gelang kuning nilainya = 4 dan gelang violet nilainya = 7. Jadi gelang pertama dan kedua atau kuning dan violet berurutan, nilai satuannya adalah 47. Gelang ketiga adalah faktor pengali, dan jika warna gelangnya merah berarti faktor pengalinya adalah 100. Sehingga dengan ini diketahui nilai resistansi resistor tersebut adalah nilai satuan x faktor pengali atau $47 \times 100 = 4.7K$ Ohm dan toleransinya adalah 5%.

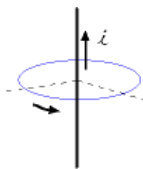
Spesifikasi lain yang perlu diperhatikan dalam memilih resistor pada suatu rancangan selain besar resistansi adalah besar watt-nya. Karena resistor bekerja dengan dialiri arus listrik, maka akan terjadi disipasi daya berupa panas sebesar $W=I^2R$ watt.

Semakin besar ukuran fisik suatu resistor bisa menunjukkan semakin besar kemampuan disipasi daya resistor tersebut.

Umumnya di pasar tersedia ukuran 1/8, 1/4, 1, 2, 5, 10 dan 20 watt. Resistor yang memiliki disipasi daya 5, 10 dan 20 watt umumnya berbentuk kubik memanjang persegi empat berwarna putih, namun ada juga yang berbentuk silinder. Tetapi biasanya untuk resistor ukuran jumbo ini nilai resistansi dicetak langsung dibadannya, misalnya 100 5W.

Induktor

Masih ingat aturan tangan kanan pada pelajaran fisika ? Ini cara yang efektif untuk mengetahui arah medan listrik terhadap arus listrik. Jika seutas kawat tembaga diberi aliran listrik, maka di sekeliling kawat tembaga akan terbentuk medan listrik. Dengan aturan tangan kanan dapat diketahui arah medan listrik terhadap arah arus listrik. Caranya sederhana yaitu dengan mengacungkan jari jempol tangan kanan sedangkan keempat jari lain menggenggam. Arah jempol adalah arah arus dan arah ke empat jari lain adalah arah medan listrik yang mengitarinya.



Tentu masih ingat juga percobaan dua utas kawat tembaga paralel yang keduanya diberi arus listrik. Jika arah arusnya berlawanan, kedua kawat tembaga tersebut saling menjauh. Tetapi jika arah arusnya sama ternyata keduanya berdekatan saling tarik-menarik. Hal ini terjadi karena adanya induksi medan listrik. Dikenal medan listrik dengan simbol **B** dan satuannya Tesla (T). Besar akumulasi medan listrik **B**

pada suatu luas area A tertentu didefinisikan sebagai besar *magnetic flux*. Simbol yang biasa digunakan untuk menunjukkan besar *magnetic flux* ini adalah Φ dan satuannya Weber ($\text{Wb} = \text{T}\cdot\text{m}^2$). Secara matematis besarnya adalah :

$$\Phi = BA$$

medan flux...(1)

Lalu bagaimana jika kawat tembaga itu dililitkan membentuk koil atau kumparan. Jika kumparan tersebut dialiri listrik maka tiap lilitan akan saling menginduksi satu dengan yang lainnya. Medan listrik yang terbentuk akan segaris dan saling menguatkan. Komponen yang seperti inilah yang dikenal dengan induktor selenoid.

Dari buku fisika dan teori medan yang menjelimit, dibuktikan bahwa induktor adalah komponen yang dapat menyimpan energi magnetik. Energi ini direpresentasikan dengan adanya tegangan emf (*electromotive force*) jika induktor dialiri listrik. Secara matematis tegangan emf ditulis :

$$E = -L \frac{di}{dt}$$

tegangan emf (2)

Jika dibandingkan dengan rumus hukum Ohm $V=RI$, maka kelihatan ada kesamaan rumus. Jika R disebut resistansi dari resistor dan V adalah besar tegangan jepit jika resistor dialiri listrik sebesar I . Maka L adalah induktansi dari induktor dan E adalah tegangan yang timbul jika induktor dilalui listrik.

Tegangan emf di sini adalah respon terhadap perubahan arus fungsi dari waktu terlihat dari rumus di/dt . Sedangkan bilangan negatif sesuai dengan hukum Lenz yang mengatakan efek induksi cenderung melawan perubahan yang menyebabkannya.

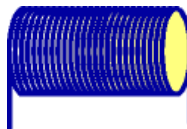
Hubungan antara emf dan arus inilah yang disebut dengan induktansi, dan satuan yang digunakan adalah (H) Henry.

Induktor disebut self-induced

Arus listrik yang melewati kabel, jalur-jalur pcb dalam suatu rangkain berpotensi untuk menghasilkan medan induksi. Ini yang sering menjadi pertimbangan dalam mendesain pcb supaya bebas dari efek induktansi terutama jika *multilayer*. Tegangan emf akan menjadi penting saat perubahan arusnya fluktuatif. Efek emf menjadi signifikan pada sebuah induktor, karena perubahan arus yang melewati tiap lilitan akan saling menginduksi. Ini yang dimaksud dengan *self-induced*. Secara matematis induktansi pada suatu induktor dengan jumlah lilitan sebanyak N adalah akumulasi flux magnet untuk tiap arus yang melewatinya :

$$L = \frac{N\Phi}{i}$$

induktansi (3)



Induktor selenoida

Fungsi utama dari induktor di dalam suatu rangkaian adalah untuk melawan fluktuasi arus yang melewatinya. Aplikasinya pada rangkaian dc salah satunya adalah untuk menghasilkan tegangan dc yang konstan terhadap fluktuasi beban arus. Pada aplikasi rangkaian ac, salah satu gunanya adalah bisa untuk meredam perubahan fluktuasi arus yang tidak diinginkan. Akan lebih banyak lagi fungsi dari induktor yang bisa diaplikasikan pada rangkaian filter, tuner dan sebagainya.

Dari pemahaman fisika, elektron yang bergerak akan menimbulkan medan elektrik di sekitarnya. Berbagai bentuk kumparan, persegi empat, setengah lingkaran ataupun lingkaran penuh, jika dialiri listrik akan menghasilkan medan listrik yang berbeda. Penampang induktor biasanya berbentuk lingkaran, sehingga diketahui besar medan listrik di titik tengah lingkaran adalah :

$$B = \mu_r \mu_0 n i$$

Medan listrik (4)

Jika dikembangkan, n adalah jumlah lilitan N relatif terhadap panjang induktor l. Secara matematis ditulis :

$$n = \frac{N}{l}$$

Lilitan per-meter.....(5)

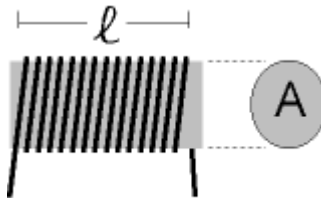
Lalu i adalah besar arus melewati induktor tersebut. Ada simbol μ yang dinamakan permeability dan μ_0 yang disebut permeability udara vakum. Besar

permeability μ tergantung dari bahan inti (*core*) dari induktor. Untuk induktor tanpa inti (*air winding*) $\mu = 1$.

Jika rumus-rumus di atas di subsitusikan maka rumus induktansi (rumus 3) dapat ditulis menjadi :

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 A}{\ell}$$

Induktansi Induktor (6)



Induktor selenoida dengan inti (core)

L : induktansi dalam H (Henry)

μ : permeability inti (*core*)

μ_0 : permeability udara vakum

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

N : jumlah lilitan induktor

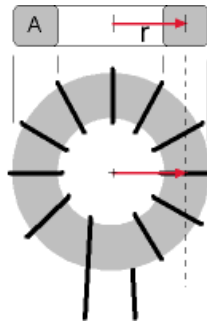
A : luas penampang induktor (m^2)

ℓ : panjang induktor (m)

Inilah rumus untuk menghitung nilai induktansi dari sebuah induktor. Tentu saja rumus ini bisa dibolak-balik untuk menghitung jumlah lilitan induktor jika nilai induktansinya sudah ditentukan.

Toroid

Ada satu jenis induktor yang kenal dengan nama toroid. Jika biasanya induktor berbentuk silinder memanjang, maka toroid berbentuk lingkaran. Biasanya selalu menggunakan inti besi (*core*) yang juga berbentuk lingkaran seperti kue donat.



Toroida

Jika jari-jari toroid adalah r , yaitu jari-jari lingkaran luar dikurang jari-jari lingkaran dalam. Maka panjang induktor efektif adalah kira-kira :

$$\ell = 2\pi r$$

Keliling lingkaran toroida (7)

Dengan demikian untuk toroida besar induktansi L adalah :

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 A}{2\pi r}$$

Induktansi Toroida(8)

Salah satu keuntungan induktor berbentuk toroid, dapat induktor dengan induktansi yang lebih besar dan dimensi yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan induktor berbentuk silinder. Juga karena toroid umumnya menggunakan inti (*core*) yang melingkar, maka medan induksinya tertutup dan relatif tidak menginduksi komponen lain yang berdekatan di dalam satu pcb.

Ferit dan Permeability

Besi lunak banyak digunakan sebagai inti (*core*) dari induktor yang disebut ferit. Ada bermacam-macam bahan ferit yang disebut ferromagnetik. Bahan dasarnya adalah bubuk besi oksida yang disebut juga *iron powder*. Ada juga ferit yang dicampur dengan bahan bubuk lain seperti *nickle*, *manganase*, *zinc* (seng) dan *magnesium*. Melalui proses yang dinamakan kalsinasi yaitu dengan pemanasan tinggi dan tekanan tinggi, bubuk campuran tersebut dibuat menjadi komposisi yang padat. Proses pembuatannya sama seperti membuat keramik. Oleh sebab itu ferit ini sebenarnya adalah keramik.

Ferit yang sering dijumpai ada yang memiliki $\mu = 1$ sampai $\mu = 15.000$. Dapat dipahami penggunaan ferit dimaksudkan untuk mendapatkan nilai induktansi yang lebih besar relatif terhadap jumlah lilitan yang lebih sedikit serta dimensi induktor yang lebih kecil.

Penggunaan ferit juga disesuaikan dengan frekuensi kerjanya. Karena beberapa ferit akan optimum jika bekerja pada selang frekuensi tertentu. Berikut ini adalah beberapa contoh bahan ferit yang dipasar dikenal dengan kode nomer materialnya. Pabrik pembuat biasanya dapat memberikan data kode material, dimensi dan permeability yang lebih detail.

| Material No. | μ | Freq. Optimum MHz |
|--------------|--------|----------------------|
| 67 | 40 | 10 - 80 |
| 68 | 20 | 80 - 180 |
| 77 | 2.000 | 0.5 - 50 |
| F | 3.000 | 0.5 - 50 |
| J | 5.000 | < 1 |
| W | 10.000 | < 1 |
| H | 15.000 | < 200 kHz |

data material ferit

Sampai di sini kita sudah dapat menghitung nilai induktansi suatu induktor.

Misalnya induktor dengan jumlah lilitan 20, berdiameter 1 cm dengan panjang 2 cm serta menggunakan inti ferit dengan $\mu = 3000$. Dapat diketahui nilai induktansinya adalah :

$$L \approx 5.9 \text{ mH}$$

Selain ferit yang berbentuk silinder ada juga ferit yang berbentuk toroida. Umumnya dipasar tersedia berbagai macam jenis dan ukuran toroida. Jika datanya lengkap, maka kita dapat menghitung nilai induktansi dengan menggunakan rumus-rumus yang ada. Karena perlu diketahui nilai permeability bahan ferit, diameter lingkaran luar, diameter lingkaran dalam serta luas penampang toroida. Tetapi biasanya pabrikan hanya membuat daftar indeks induktansi (*inductance index*) A_L . Indeks ini dihitung berdasarkan dimensi dan permeability ferit. Dengan data ini dapat dihitung jumlah lilitan yang diperlukan untuk mendapatkan nilai induktansi tertentu. Seperti contoh

tabel A_L berikut ini yang satuannya mH/100 lilitan.

| Material No. 3 | 1 | 2 | 10 | |
|----------------|-------|-------|------|--------|
| Warna | Grey | Blue | Red | Black |
| L | 35 | 20 | 10 | 6 |
| Freq. Opt. MHz | < 0.5 | 0.5-5 | 2-30 | 30-100 |
| T30 | 140 | 85 | 43 | 25 |
| T44 | 180 | 105 | 52 | 33 |
| T50 | 175 | 100 | 49 | 31 |
| T130 | 350 | 200 | 110 | |
| T200 | 425 | 250 | 200 | 100 |
| T400 | | | 185 | |

Tabel A_L

Rumus untuk menghitung jumlah lilitan yang diperlukan untuk mendapatkan nilai induktansi yang diinginkan adalah :

$$N = 100 \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

Indeks A_L (9)

Misalnya digunakan ferit toroida T50-1, maka dari table diketahui nilai $A_L = 100$. Maka untuk mendapatkan induktor sebesar $4\mu\text{H}$ diperlukan lilitan sebanyak :

$$N \approx 20 \text{ lilitan}$$

Rumus ini sebenarnya diperoleh dari rumus dasar perhitungan induktansi dimana induktansi L berbanding lurus dengan kuadrat jumlah lilitan N^2 . Indeks A_L umumnya sudah baku dibuat oleh pabrikan sesuai dengan dimensi dan permeability bahan feritnya.

Permeability bahan bisa juga diketahui dengan kode warna tertentu. Misalnya abu-abu, hitam, merah, biru atau kuning. Sebenarnya lapisan ini bukan hanya sekedar warna yang membedakan permeability, tetapi berfungsi juga sebagai pelapis atau isolator. Biasanya pabrikan menjelaskan berapa nilai tegangan kerja untuk toroida tersebut.

Contoh bahan ferit toroida di atas umumnya memiliki permeability yang kecil. Karena bahan ferit yang demikian terbuat hanya dari bubuk besi (*iron powder*). Banyak juga ferit toroid dibuat dengan nilai permeability μ yang besar. Bahan ferit tipe ini terbuat dari campuran bubuk besi dengan bubuk logam lain. Misalnya ferit toroida FT50-77 memiliki indeks $A_L = 1100$.

Kawat tembaga

Untuk membuat induktor biasanya tidak diperlukan kawat tembaga yang sangat panjang. Paling yang diperlukan hanya puluhan sentimeter saja, sehingga efek resistansi bahan kawat tembaga dapat diabaikan. Ada banyak kawat tembaga yang bisa digunakan. Untuk pemakaian yang profesional di pasar dapat dijumpai kawat tembaga dengan standar AWG (*American Wire Gauge*). Standar ini tergantung dari diameter kawat, resistansi dan sebagainya. Misalnya kawat tembaga AWG32 berdiameter kira-kira 0.3mm, AWG22 berdiameter 0.7mm ataupun AWG20 yang berdiameter kira-kira 0.8mm. Biasanya yang digunakan adalah kawat tembaga tunggal dan memiliki isolasi.

Penutup

Sayangnya untuk pengguna amatir, data yang diperlukan tidak banyak tersedia di toko eceran. Sehingga terkadang dalam membuat induktor jumlah lilitan yang semestinya berbeda dengan hasil perhitungan teoritis. Kawat tembaga yang digunakan bisa berdiameter berapa saja, yang pasti harus lebih kecil dibandingkan diameter penampang induktor. Terkadang pada prakteknya untuk membuat induktor sendiri harus coba-coba dan toleransi induktansinya cukup besar. Untuk mendapatkan nilai induktansi yang akurat ada efek kapasitif dan resistif yang harus diperhitungkan. Karena ternyata arus yang melewati kawat tembaga hanya dipermukaan saja. Ini yang dikenal dengan istilah efek kulit (*skin effect*). Ada satu tip untuk membuat induktor yang baik, terutama induktor berbentuk silinder. Untuk memperoleh nilai "Q" yang optimal panjang induktor sebaiknya tidak lebih dari 2x diameter penampangnya. Untuk toroid usahakan lilitannya merata dan rapat.