

Model Konsep Hukum Ampere dan Penerapannya Untuk Menentukan Arus Listrik Di dalam Material-Material Semikonduktor

Hubertus Ngaderman, Ego Srivajawaty Sinaga
Universitas Cenderawasih
*ngadermanh@gmail.com

ABSTRACT

The purpose of this research is to theoretically verify Ampere's law concept and adopt this concept to find electric current in semiconductor material-based devices. The method used in this study is to theoretically examine the concept of Ampere's law and prove this law in mathematical language, therefore a mathematical tool is presented, namely the operator del which makes divergence and curl in an attempt to prove the correctness of Ampere's law. Not only reviewing the mathematical operators, but also a little computation to calculate the electric current in semiconductor materials and pn junction diodes. In proving the absence of an electric current in a direction parallel to the magnetic field of the semiconductor material and the PN junction diode, magnetic field divergence is used. To prove the existence of an electric current in the semiconductor material and pn junction diodes, a magnetic field curl is used.

Keywords: Ampere's Law; Electric Current.

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah memverifikasikan konsep hukum Ampere secara teoritis dan mengadopsi konsep tersebut guna mencari arus listrik di dalam divais-divais berbasis material semikonduktor. Metode yang digunakan di dalam penelitian ini adalah mengkaji secara teoritis konsep tentang hukum Ampere dan membuktikan hukum tersebut di dalam bahasa matematis, oleh karena itu dihadirkan piranti matematis yaitu operator del yang menjadikan divergensi dan curl di dalam usaha untuk membuktikan kebenaran hukum Ampere. Bukan hanya meninjau operator matematis, tetapi juga sedikit komputasi untuk menghitung arus listrik di dalam material semikonduktor dan dioda *pn* junction. Di dalam membuktikan ketiadaan arus listrik di dalam arah sejajar medan magnet material semikonduktor dan dioda *pn* junction, digunakan divergensi medan magnet. Untuk membuktikan adanya arus listrik di dalam material semikonduktor dan dioda *pn* junction, digunakan curl medan magnet.

Kata kunci: Hukum Ampere; Arus Listrik.

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](#) license



1. Pendahuluan

Data menunjukkan bahwa volume penjualan divais semikonduktor berbasis industri elektronika sebelum abad 20 dan proyek penjualan untuk tahun 2010 meningkat secara signifikan [1]. Data tersebut menunjukkan juga produk dunia yang menyolok yaitu industri penjualan mobil, industri pembuatan baja dan industri semikonduktor, dan telah dicatat bahwa industri elektronik mengungguli industri mobil di tahun 1998. Jika arus perkembangan tersebut berlangsung terus, di dalam tahun 2010 volume penjualan dari industri elektronik akan mencapai tiga trilyun dolar dan akan menyumbang sekitar 10% produk dunia yang menyolok. Industri semikonduktor adalah sebuah subset (kunci) dari industri elektronika, industri tersebut akan bertumbuh pada nilai mantap yang

semakin tinggi melampaui industri baja di dalam awal abad duapuluhan dan industri semikonduktor tersebut mengangkat 25% industri elektronika di tahun 2010.

Studi sistematis yang sangat dini dari divais semikonduktor untuk kontak-kontak logam-semikonduktor, dipertalikan oleh Braun dimana diteliti di tahun 1874. Ia menemukan bahwa resistansi dari kontak-kontak antara logam-logam dan logam sulfides bergantung pada besar dan polaritas dari tegangan yang diberikan.

Fenomena elektroluminasi (untuk light emitting dioda) telah ditemukan oleh Round di dalam tahun 1907. Di dalam tahun 1947, transistor titik kontak ditemukan oleh Bardeen Brattain. Transistor yang pertama terdiri atas dua titik kontak dengan dasar triangular kristal kwarsa terbuat dari dua jalur emas kertas perak atau timah yang terpisahkan

dengan jarak sekitar $50\mu m$ ($1\mu m = 10^{-4}cm$), dimana ditekan pada permukaan semikonduktor. Bahan semikonduktor yang dipakai adalah germanium. Dengan menggunakan satu kontak emas bias tegangan maju (tegangan positif) dengan hubungan pada tiga terminal dan yang lain bias tegangan balik, aksi transistor tersebut diamati menghasilkan penguatan input signal. Transistor bipolar adalah sebuah kunci divais semikonduktor dan mengantarkan ke era elektronik modern.

Di dalam tahun 1952 Ebers mengembangkan model dasar untuk thyristor dimana merupakan divais peralatan saklar. Sel surya telah dikembangkan oleh Chapin dan kawan-kawan, di dalam tahun 1954 menggunakan sebuah junction $p - n$ silicon [2][3]. Sel surya adalah kandidat yang penting untuk sumber energi yang berkaitan dengan aktivitas di bumi [4]. Di dalam tahun 1957, Kroemer mengusulkan transistor bipolar heterojunction untuk meningkatkan performansi transistor, divais ini adalah secara potensial satu dari divais semikonduktor tercepat. Pada tahun 1958 Esaki mengamati karakteristik resistansi negatif di dalam sebuah dop padat $p - n$ junction, dimana memudahkan penemuan dioda tunel (terowongan). Dioda tunel (terowongan) dan asosiasi fenomena terowongannya adalah penting untuk kontak ohmik dan transpor pembawa yang melalui film tipis.

Divais yang sangat penting untuk kemajuan integrated circuit (IC) adalah MOSFET. Divais pertama MOSFET menggunakan sebuah oksidasi termal substrat silikon. Divais ini mempunyai panjang sebuah pintu gerbang (gate) $20\mu m$ dan ketebalan pintu gerbang (gate) oksida $100nm$. Dua lubang kunci adalah sumber (source) dan saluran (drain) kontak, dan puncak luasan yang panjang adalah gate aluminium diupayakan melalui tutupan logam. Meskipun saat ini MOSFET mempunyai ukuran yang diperkecil di dalam wilayah submikron, pilihan silikon dan dioksida pertumbuhan silikon panas digunakan di dalam MOSFET pertama, dengan menggunakan kombinasi dari material-material. MOSFET dan relasinya IC, sekarang menjanjikan sekitar 90% pasar divais semikonduktor. Sebuah MOSFET yang sangat teramat kecil dengan memiliki panjang saluran $30nm$ baru-baru ini telah didemonstrasikan. Divais ini bisa berfungsi seperti basis untuk kemajuan pengembangan terbesar cip rangkaian IC yang berisi melebihi satu trilyun (10^{12}) divais.

Tiga divais microwave yang penting telah ditemukan atau direalisasikan di dalam 3 tahun berikutnya. Divais pertama adalah transfered electron diode (TED, juga dikenal Gunn dioda) oleh Gunn di tahun 1963. TED digunakan secara luas di dalam aplikasi-aplikasi gelombang milimeter sebagai sistem deteksi, remote kontrol dan instrumen tes gelombang mikro. Divais kedua adalah dioda IMPATT, pengoperasiannya pertama

kali oleh Johnson dkk, di tahun 1965. Dioda IMPATT bisa menciptakan daya gelombang kontinyu yang sangat tinggi pada frekuensi gelombang milimeter dari semua divais semikonduktor, digunakan di dalam sistem radar dan sistem alarm. MESFET, ditemukan oleh Mead di tahun 1966. Ini adalah sebuah divais kunci untuk monolithic microwave IC (MMIC).

Beberapa tahun terakhir telah dikembangkan secara intensif sel surya dengan bahan semikonduktor organik atau yang dikenal dengan sel surya organik (SSO). Dalam hal ini SSO mempunyai potensi sebagai piranti pengkonversi energi yang lebih murah dan mudah dalam fabrikasinya jika dibandingkan dengan sel surya anorganik. Selain itu, rekayasa hingga level molekuler dan sintesis bahan semikonduktor organik juga tidak terbatas, bahkan dapat diekstraksi dari tumbuh-tumbuhan yang dapat dibudidayakan [5].

Pengembangan SSO makin pesat akhir-akhir ini karena juga dipicu oleh keberhasilan pengembangan divais LED organik (OLED) yang sudah memasuki tahap komersial. Hingga saat ini efisiensi konversi SSO pada umumnya masih di bawah ambang komersial 5%. Oleh karena masih dibawah 5% tersebut maka penelitian secara besar-besaran dilakukan oleh para peneliti.

Sebagai bidang kajian yang baru, banyak mekanisme fisis SSO yang belum dapat difahami. Masalah mekanisme fisis SSO tersebut yang belum dapat dipahaminya karena material organik (yang merupakan bahan utama dalam SSO) belum dikaji secara mendalam. Sifat-sifat konduktivitas listrik material organik belum dipahaminya, begitu pula mobilitas pembawa di dalam material organik juga belum dipahaminya secara komprehensif. Sebab-sebab belum dapat dipahaminya oleh karena para fisikawan jarang melakukan penelitian mengenai konduktivitas elektrik material organik. Material organik tersebut dianggap isolator. Tetapi pada tahun 1977 Hagar dan McDiarmid menemukan bahwa material organik tersebut memiliki sifat-sifat konduktor (lebih tepatnya semikonduktor).

Konduktivitas di dalam material organik diduga oleh molekul yang bermuatan. Oleh karena masalah konduktivitas listrik material organik tersebut belum dipahaminya secara mendalam, maka dalam penelitian ini penulis berusaha mengkaji konduktivitas elektrik di dalam bahan dengan menggunakan hukum Ampere.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan di dalam penelitian ini adalah mengkaji secara teoritis konsep tentang hukum Ampere dan membuktikan hukum tersebut di dalam bahasa matematis.

Operator ∇

Untuk mentransformasikan Hukum Ampere ke dalam bentuk diferensial maka kita harus memperdalam pengertian kita mengenai metoda vektor dan khasnya menjadi paham mengenai operator vektor ∇ [6][7][8].

Kita telah melihat bagaimana untuk mendapatkan komponen medan elektrostatis (vektor) \vec{E} di setiap titik dari fungsi potensial (skalar) $V(x, y, z)$ dengan menggunakan diferensial parsial. Jadi

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} \quad \text{dan} \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$$

sehingga medan elektrostatis

$$\vec{E} = \hat{i}E_x + \hat{j}E_y + \hat{k}E_z$$

dapat dituliskan sebagai

$$\vec{E} = -\left(\hat{i}\frac{\partial V}{\partial x} + \hat{j}\frac{\partial V}{\partial y} + \hat{k}\frac{\partial V}{\partial z}\right) \quad (1)$$

Kita dapat menuliskan persamaan (1) dalam notasi vektor yang kompak sebagai

$$\vec{E} = -\nabla V$$

$$\nabla = \hat{i}\frac{\partial}{\partial x} + \hat{j}\frac{\partial}{\partial y} + \hat{k}\frac{\partial}{\partial z} \quad (2)$$

Operator ini berguna dalam pembahasan medan skalar dan medan vektor. Diberikan sebarang medan skalar ψ maka kita dapat membentuk sebuah medan vektor, yang dinamakan gradien dari ψ dan yang dituliskan sebagai $grad \psi$ atau $\nabla\psi$, dengan memakaikan ∇ kepada ψ . Diberikan sebuah medan vektor $\vec{U} = U_x\hat{i} + U_y\hat{j} + U_z\hat{k}$ maka kita dapat memakaikan operator ∇ kepada medan vektor tersebut dalam dua cara yang berbeda. Salah satu cara tersebut mengambil perkalian titik dari ∇ dan \vec{U} , yang menghasilkan medan skalar yang dinamakan divergensi dari \vec{U} dan yang dituliskan sebagai $div \vec{U}$ atau $\nabla \cdot \vec{U}$. Cara lain adalah mengambil perkalian silang dari ∇ dan \vec{U} yang dinamakan medan vektor dari yang dinamakan $curl$ dari \vec{U} dan yang dituliskan $curl \vec{U}$ atau $\nabla \times \vec{U}$. Operasi-operasi ini dapat diikhtisarkan sebagai

$$grad \psi = \nabla\psi = \hat{i}\frac{\partial\psi}{\partial x} + \hat{j}\frac{\partial\psi}{\partial y} + \hat{k}\frac{\partial\psi}{\partial z} \quad (3)$$

$$div \vec{U} = \nabla \cdot \vec{U} = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (4)$$

$$curl \vec{U} = \nabla \times \vec{U} = \hat{i}\left(\frac{\partial U_z}{\partial y} - \frac{\partial U_y}{\partial z}\right) + \hat{j}\left(\frac{\partial U_x}{\partial z} - \frac{\partial U_z}{\partial x}\right) + \hat{k}\left(\frac{\partial U_y}{\partial x} - \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \quad (5)$$

Perhatikan bahwa $grad \psi$ dan $curl \vec{U}$ adalah vektor, sedangkan $div \vec{U}$ adalah sebuah skalar.

Operator lain yang sering didapati adalah ∇^2 ("del kuadrat"). Operator tersebut tak lain dari $\nabla \cdot \nabla$, atau seperti yang dapat diperlihatkan dari persamaan (2.2),

$$\nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Bila kita memakaikan ∇^2 kepada sebuah medan skalar ψ , maka kita mendapatkan

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \quad (6)$$

Untuk sebuah medan vektor \vec{U} , operasi $\nabla^2 \vec{U}$ adalah

$$\nabla^2 \vec{U} = \hat{i}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\vec{U}_x + \hat{j}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\vec{U}_y + \hat{k}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\vec{U}_z \quad (7)$$

Dan berikut adalah beberapa operasi vektor yang dirangkum [5][6]:

$$(\vec{U} \cdot \nabla')\left(\frac{x-x'}{\psi^3}\right) = \nabla' \cdot \left[\frac{(x-x')}{\psi^3}\vec{U}\right] - \left(\frac{x-x'}{\psi^3}\right)(\nabla' \cdot \vec{U}) \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \left(\vec{U} \times \frac{\psi}{\psi^3}\right) = \frac{\psi}{\psi^3} \cdot (\nabla \times \vec{U}) - \vec{U} \cdot \left(\nabla \times \frac{\psi}{\psi^3}\right) - \vec{U} \cdot \left(\nabla \times \frac{\psi}{\psi^3}\right) \quad (9)$$

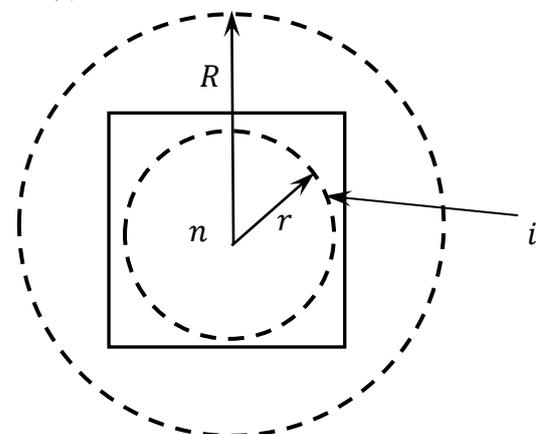
$$\nabla \times \frac{\psi}{\psi^3} = \frac{1}{\psi^3}(\nabla \times \vec{\psi}) - \vec{\psi} \times \left(\nabla \frac{1}{\psi^3}\right) \quad (10)$$

$$\nabla \times \left(\vec{U} \times \frac{\psi}{\psi^3}\right) = \vec{U} \left(\nabla \cdot \frac{\psi}{\psi^3}\right) - (\vec{U} \cdot \nabla) \frac{\psi}{\psi^3} \quad (11)$$

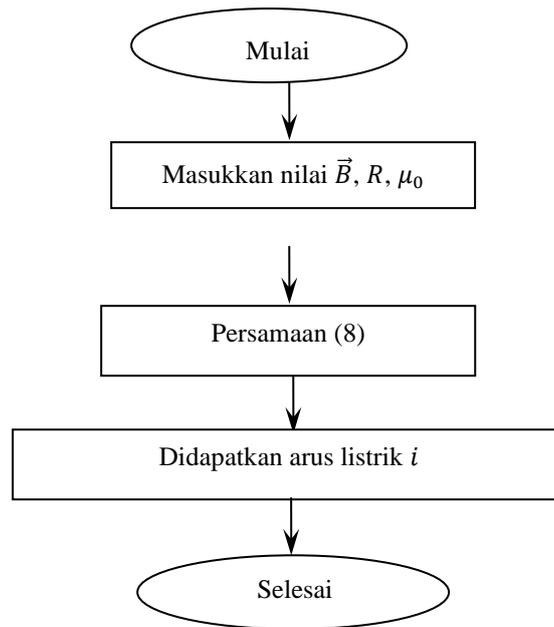
Flow Chart Perhitungan

Dari persamaan (5), kita dapat mencari besar nilai arus i , di dalam semikonduktor intrinsik atau dioda pn junction yang dirumuskan [6][7][8][9][10] sebagai berikut:

$$i = \frac{B \cdot 2\pi R}{\mu_0} \quad (8)$$



Gambar 1. Medan magnet



Gambar 2. Flowcart

3. Hasil dan Pembahasan

Di dalam membuktikan ketiadaan arus listrik di dalam arah sejajar medan magnet material semikonduktor dan dioda *pn* junction, digunakan divergensi medan magnet. Untuk membuktikan adanya arus listrik di dalam material semikonduktor dan dioda *pn* junction, digunakan curl medan magnet.

Hasil dan Pembahasan Divergensi \vec{B} , Curl \vec{B} dan Hukum Ampere

Sama seperti persamaan (7), kita menggantikan arus i dengan rapat arus J , maka hukum Biot Savart untuk kasus yang umum dari volume arus dibaca [4]

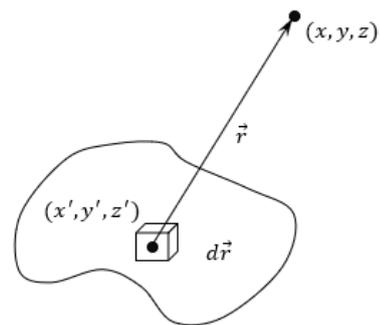
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J} \times \hat{r}}{r^2} dr = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J} \times \vec{r}}{r^3} dr \quad (12)$$

Rumus ini memberikan medan magnetik pada titik $P(x, y, z)$, di dalam koordinat Kartesian, di dalam hubungan dengan sebuah integral meliputi distribusi dari arus \vec{J} pada (x', y', z') (Gambar 3). Ini baik untuk menjadi secara absolut tegas pada tahapan ini:

$$\begin{aligned} \vec{B} &\text{ adalah sebuah fungsi dari } (x, y, z), \\ \vec{J} &\text{ adalah sebuah fungsi dari } (x', y', z'), \\ \vec{r} &= (x - x')\hat{i} + (y - y')\hat{j} + (z - z')\hat{k} \\ d\vec{r} &= dx'\hat{i} + dy'\hat{j} + dz'\hat{k} \end{aligned}$$

Integrasi adalah meliputi koordinat utama, sebuah divergensi adalah berhubungan dengan koordinat bukan utama. Menerapkan divergensi pada persamaan (12), kita mendapat:

$$\nabla \cdot \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \nabla \cdot \left(\vec{J} \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right) dr \quad (13)$$



Gambar 3. Medan magnet pada titik P didalam koordinat kartesian (x,y,z) dan dihubungkan dengan arus J didalam koordinat kartesian (x', y', z')

Meminta persamaan (19),

$$\nabla \cdot \left(\vec{J} \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right) = \frac{r}{r^3} \cdot (\nabla \times \vec{J}) - \vec{J} \cdot \left(\nabla \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right) = -\vec{J} \cdot \left(\nabla \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right) \quad (14)$$

($\nabla \times \vec{J} = 0$ karena \vec{J} tidak bergantung pada variabel-variabel (x, y, z) .) Sementara itu, menurut persamaan (9),

$$\nabla \times \frac{\vec{r}}{r^3} = \frac{1}{r^3} (\nabla \times \vec{r}) - \vec{r} \times \left(\nabla \frac{1}{r^3} \right). \quad (15)$$

Sekarang, $\nabla \times \vec{r} = 0$, sementara $\nabla \left(\frac{1}{r^3} \right) = -3\vec{r}/r^5$, jadi sisi sebelah kanan dari (15) lenyap, dan disini juga sisi sebelah kanan dari (14). Di dalam pandangan dari (13), oleh karena itu, divergensi \vec{B} adalah nol:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (16)$$

Menerapkan curl untuk (12), kita mendapat:

$$\nabla \times \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \nabla \times \left(\vec{j} \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right) dr. \quad (17)$$

Kembali lagi, strategi kita adalah untuk mengekspansikan keluar integrasi diatas, menggunakan beberapa produk aturan. Menunjuk persamaan (10),

$$\nabla \times \left(\vec{j} \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right) = \vec{j} \left(\nabla \cdot \frac{\vec{r}}{r^3} \right) - (\vec{j} \cdot \nabla) \frac{\vec{r}}{r^3}. \quad (18)$$

(Telah diletakkan suku-suku melibatkan derivatif \vec{j} , sekali lagi, sebab \vec{j} tidak bergantung pada x, y, z .) Marilah memulai dengan suku kedua:

$$-(\vec{j} \cdot \nabla) \frac{\vec{r}}{r^3} = (\vec{j} \cdot \nabla') \frac{\vec{r}}{r^3} \quad (19)$$

(Sebab turunan bertindak hanya pada (\vec{r}/r^3) , bisa diubah dari ∇ menjadi ∇' dengan biaya sebuah tanda minus – jika anda telah melupakan sebab musabab, lihat kembali penjelasan yang mengiringi persamaan dibawah ini). Komponen x , secara khusus adalah

$$(\vec{j} \cdot \nabla') \left(\frac{x-x'}{r^3} \right) = \nabla' \cdot \left[\frac{(x-x')}{r^3} \vec{j} \right] - \left(\frac{x-x'}{r^3} \right) (\nabla' \cdot \vec{j})$$

dimana telah digunakan persamaan (8). Sekarang, untuk arus kontinu divergensi \vec{j} adalah nol, jadi

$$\left[-(\vec{j} \cdot \nabla) \frac{\vec{r}}{r^3} \right]_x = \nabla' \cdot \left[\frac{(x-x')}{r^3} \vec{j} \right],$$

dan oleh karena itu kontribusi ini untuk integral (17) bisa ditulis

$$\int_{\text{volume}} \nabla' \cdot \left[\frac{(x-x')}{r^3} \vec{j} \right] dr = \int_{\text{permukaan}} \frac{(x-x')}{r^3} \vec{j} \cdot d\vec{a} \quad (20)$$

(Alasan untuk menyetel dari ∇ ke ∇' adalah, di dalam kenyataan, untuk membolehkan aplikasi ini pada teorema divergensi). Tetapi apa wilayah yang kita integrasikan padanya? Baik, volumenya akan tampak di dalam hukum Biot Savart, (12) – cukup besar, yang adalah, melingkungi semua arus. Kita bisa membuat ini menjadi lebih besar daripada itu, jika kita menyukai, $\vec{j} = 0$ diluar dimana saja, jadi dia akan menambah tidak ada untuk integralnya. Tetapi poin utama adalah bahwa pada bidang batas arus adalah nol: semua arus adalah secara aman di dalam. Menurut (20) memberikan ketiadaan dan disana menyisakan hanya suku pertama di dalam (18):

$$\nabla \times \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \vec{j} \left(\nabla \cdot \frac{\vec{r}}{r^3} \right) dr \quad (21)$$

Secara matematis, ini adalah identik dengan integral permukaan kita di dalam perhitungan divergensi \vec{E} ,

hanya $(1/\epsilon_0) \rho$ telah digantikan dengan $\mu_0 \vec{j}$ – atau, lebih baik, tiga persamaannya identik dengan persamaan

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \nabla \cdot \left(\frac{\vec{r}}{r^2} \right) \rho(x', y', z') dx' dy' dz'.$$

sama untuk masing-masing komponen Kartesian. Bisa dikutip secara ringkas hasil yang lebih dulu:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \quad (22)$$

memastikan bahwa persamaan

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j},$$

tidak dibatasi untuk arus-arus yang membentuk garis lurus, tetapi berpegang benar-benar secara umum di dalam magnet statis.

Persamaan (23) adalah hukum Ampere di dalam bentuk diferensial. Dia bisa dikonversikan kedalam bentuk integral dengan divais biasa yaitu menerapkan satu dari “teorema fundamental” – di dalam kasus ini teorema Stokes:

$$\int (\nabla \times \vec{B}) \cdot d\vec{a} = \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{j} \cdot d\vec{a}.$$

Sekarang, $\int \vec{j} \cdot d\vec{a}$ adalah arus total yang melewati melalui permukaan, dimana kita akan memanggil I_{tertutup} (“tertutup” oleh integral garis):

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{tertutup}} \quad (24)$$

Ini adalah versi integral dari hukum Ampere, dia menyamaratakan persamaan

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{tertutup}}$$

kedalam semua magnet statis. Catatan bahwa (24) mewarisi tanda kedwiarthian dari teorema Stokes: dimana jalan yang mengelilingi rangkaian apakah diandaikan untuk berfungsi? Dan yang mana arah yang melalui permukaan bersesuaian dengan sebuah arus “positif”? Resolusi, seperti biasanya, adalah aturan tangan kanan: Jika jari-jari dari tangan kananmu menunjukkan arah integrasi sekeliling bidang batas, maka ibu jari menetapkan arah dari sebuah arus positif.

Hanya seperti hukum Biot Savart memainkan aturan di dalam magnet statik sama dengan hukum Coulomb diasumsikan di dalam listrik statis, jadi Ampere memainkan aturan Gauss. Secara khusus, untuk arus dengan simetri khusus, hukum Ampere di dalam bentuk integral menawarkan sebuah arti efisien yang cantik dan luar biasa untuk menemukan medan magnetik.

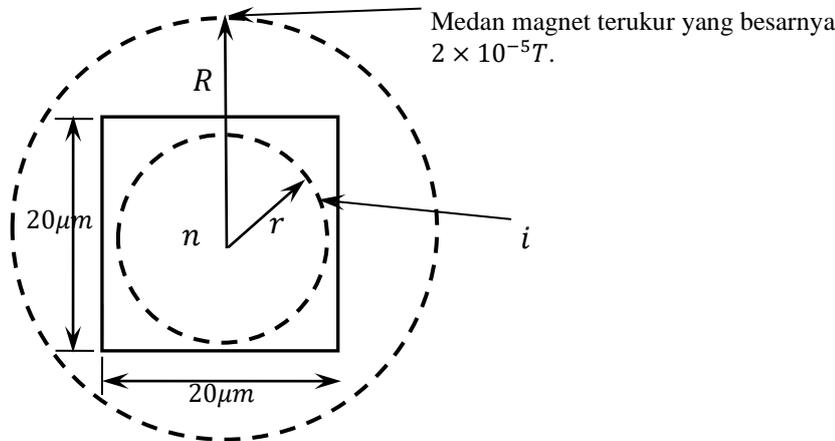
Hasil dan Pembahasan Penentuan Arus Listrik Di dalam Semikonduktor Intrinsik dan Dioda pn Junction.

Jika kita bisa mengukur medan magnet diluar semikonduktor intrinsik dan dioda pn junction, maka kita bisa menentukan arus listrik dimana saja (maksudnya di dalam material

semikonduktor intrinsik dan dioda *pn* junction). Oleh karena itu jika medan magnet yang terukur memiliki besar $2 \times 10^{-5}T$, dengan menggunakan persamaan (8) yang dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$i = \frac{B \cdot 2\pi R}{\mu_0} \quad (8)$$

maka arus listrik yang didapat pada jarak $R = r$, dengan $r = 7\mu m$ adalah $7 \times 10^{-4}A$.



Gambar 4. Medan Magnet yang terukur besarnya

4. Kesimpulan

Tujuan utama dari penelitian ini adalah menentukan arus listrik di dalam material. Arus listrik di dalam suatu material tidak dapat diukur lewat alat eksperimen, oleh karena itu digunakan hukum Ampere. Arus adalah medan yang dinamis sehingga tidak bisa digunakan konsep Laplace (yang hanya untuk medan statis). Material yang ditinjau adalah semikonduktor intrinsik dan divais elektronik dioda *pn* junction.

Telah didapat untuk medan magnet yang terukur sebesar $2 \times 10^{-5}T$, maka arus listrik yang mengalir pada jarak $r = 7\mu m$ dari pusat material adalah $7 \times 10^{-4}A$. Bukan hanya arus listrik dengan jarak $r = 7\mu m$ dari pusat material saja yang kita bisa tentukan jika variabel terukur adalah medan magnet sebesar $2 \times 10^{-5}T$, tetapi di titik dimana saja di dalam material tersebut dapat kita tentukan dengan menggunakan aplikasi dari hukum ini yang dikenal sebagai hukum Ampere.

Apakah hukum ini bisa memiliki ketepatan di dalam menghitung arus listrik di dalam material. Pertanyaan ini telah terjawabkan jika kita kembali melakukan kajian matematis dimana melibatkan operator del sebagai piranti yang digunakan penulis. Operator tersebut terwujud di dalam divergensi medan magnet dan curl medan magnet, yang

kembali akan menghasilkan hukum Ampere di dalam situasi praktis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sze S.M., 2003. *Physics of Semiconductor Devices* 2nd edition, John Wiley and Sons.
- [2] Ngaderman H, 2008. *Pemodelan Karakteristik Rapat Arus-Tegangan dan Distribusi Medan Listrik dalam Sel Surya Organik Heterojunction*.
- [3] Ngaderman H, 2008. *Pe Tesis*, Universitas Gajah Mada Yogyakarta.
- [4] Triyana K, 2004, *Heterojunction Organic Solar cell Based on Phthalocyanine and Perylene*, PhD Thesis, Kyushu University.
- [5] Singh V.P., Parsarathy B., R.S. Singh, A. Aguilera, J. Anthony, M. Payne, 2006, *Characterization of high-photovoltage CuPc-based solar cell structures*, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90, 798–812
- [6] Boas M L, 1983. *Mathematical Methods In The Physical Science*. John Wiley and Sons, De Paul University.
- [7] Griffiths D J. *Introduction To Electrodynamics*. Prentice Hall Of India Private Limited.
- [8] Halliday D, Resnick R dan Walker J. *Fisika Jilid Dua Versi Diperluas*. Binarupa Aksara.
- [9] Halliday, 1986. *Fisika Jilid Dua*. Airlangga
- [10] Jogiyanto H.M, 1998. *Dasar-dasar Pemrograman Pascal*. Andi Offset, Yogyakarta.