



UNIVERSITAS INDONESIA

**KONSEP DASAR MEMRISTOR:
ANALISIS KURVA I-V TITANIUM DIOXIDE (TiO₂)
MEMRISTOR**

SKRIPSI

Franciskus Arthur M

0405030362

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
JUNI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**KONSEP DASAR MEMRISTOR:
ANALISIS KURVA I-V TITANIUM DIOXIDE (TiO₂)
MEMRISTOR**

SKRIPSI

**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

Franciskus Arthur M

0405030362

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
JUNI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Franciskus Arthur M

NPM : 0405030362

Tanda Tangan :

Tanggal : 17 Juni 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh


Nama : Franciskus Arthur M
NPM : 0405030362
Program Studi : Elektro
Judul Skripsi : KONSEP DASAR MEMRISTOR :


ANALISIS KURVA I-V TITANIUM DIOXIDE
(TiO₂) MEMRISTOR

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, MSc. 

Penguji : Arief Udhiarto, ST, MT 

Penguji : Prof. Dr. Ir. Nji Raden Poespawati, MT 

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Juni 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat mata kuliah untuk menyelesaikan program studi di Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, MSc. selaku ko-promotor yang telah menentukan dan menyetujui riset ini sebagai bagian dari riset pada Sensor Device Research Group (SDRG), bersedia meluangkan waktu untuk membimbing menentukan petunjuk dan saran dalam menyelesaikan riset ini;
- (2) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (3) sahabat dan teman – teman yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu selanjutnya.

Depok, 17 Juni 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Franciskus Arthur M
NPM : 0405030362
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-eksklusif Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**KONSEP DASAR MEMRISTOR:
ANALISIS KURVA I-V TITANIUM DIOXIDE (TiO₂)
MEMRISTOR**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : Agustus 2009

Yang menyatakan

(Franciskus Arthur M)

ABSTRAK

Nama : Franciskus Arthur M
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : KONSEP DASAR MEMRISTOR:
ANALISIS KURVA I-V TITANIUM DIOXIDE (TiO₂)
MEMRISTOR
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, MSc.

Skripsi ini membahas mengenai konsep dasar memristor dan analisis kurva I-V dari Titanium Dioxide (TiO₂) memristor. Memristor merupakan kelas element sirkuit pasif dua terminal yang menghubungkan fungsi integral dalam waktu terhadap arus dan tegangan. Fungsi ini disebut memristansi, dimana menyerupai hambatan variabel. Secara spesifik, memristor mampu mengontrol besar nilai resistansinya, namun divais yang demikian tidak secara komersial tersedia secara masal. Definisi dari memristor secara tunggal didasarkan atas fundamental variabel sirkuit, dimana serupa dengan resistor, kapasitor dan induktor. Tidak seperti ketiga elemen dasar tersebut, dimana hanya bekerja pada *linear time-invariant* atau teori LTI sistem, memristor bekerja secara nonlinear dan dapat didefinisikan oleh variasi apapun atas fungsi dari *time varying* atas muatan total. Pada sirkuit ini dilakukan pembuktian kurva I-V dari Titanium Dioxide memristor dengan membuat penurunan rumus yang selanjutnya disimulasikan dengan menggunakan program Simulink pada MATLAB. Salah satu hasil analisis dari kesimpulan menyatakan bahwa bentuk karakteristik kurva I-V didapatkan serupa dengan hasil experimental divais memristor dengan elektroda platina.

Kata kunci:
memristor, memristansi

ABSTRACT

Name : Franciskus Arthur M
Study Program : Electrical Engineering
Title : Basic Fundamental of Memristor:
Analyzing I-V curve from Titanium Dioxide (TiO₂)
Memristor
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, MSc.

In this final project discusses about basic fundamental of memristor and analyzing I-V curve from Titanium Dioxide (TiO₂) memristors works. Memristors are a class of passive two-terminal circuit elements that maintain a functional relationship between the time integrals of current and voltage. This function, called memristance, is similar to variable resistance. Specifically engineered memristors provide controllable resistance, but such devices are not commercially available. The definition of the memristor is based solely on fundamental circuit variables, similarly to the resistor, capacitor, and inductor. Unlike those three elements, which are allowed in linear time-invariant or LTI system theory, memristors are nonlinear and may be described by any of a variety of time-varying functions of net charge. In this circuit curve I-V from Titanium Dioxide can be proved by derive the formula, thus being simulated by using program Simulink from MATLAB. One of the conclusion stated that the characteristic from I-V curve is similar with the result from experimental device memristor using platinum as the electrode.

Key note:

Memristor, memristance

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
LLEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penulisan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Metode Penelitian	2
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 DASAR TEORI MEMRISTOR	4
2.1 Memristor	4
2.2 Flux magnetik pada divais pasif.....	5
2.3 Pembatasan secara fisik pada $M(q)$	7
2.4. Sistem Memristansi	7
2.5. Operasi sebagai switch.....	8
BAB 3 CARA KERJA DARI TITANIUM DIOXIDE (TiO_2)MEMRISTOR	9
3.1 Konsep Dasar Memristor	9
3.2 Titanium Dioxide Memristor (TiO_2)	10
BAB 4 ANALISA PROSES KERJA TITANIUM DIOXIDE (TiO_2) MEMRISTOR BESERTASIMULASINYA	17
BAB 5 KESIMPULAN	28
DAFTAR REFERENSI.....	29
LAMPIRAN.....	30

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Simbol Memristor	4
Gambar 3.1. Hubungan antara resistor, kapasitor, induktor, dan kapasitor	10
Gambar 3.2. Array memristor	11
Gambar 3.3. Skema cara kerja memristor.....	14
Gambar 3.4. Crossbar Architecture	15
Gambar 4.1. Memristor	18
Gambar 4.2. Grafik plot I terhadap V dengan input berupa fungsi sinusoidal $v_0\sin(\omega_0t)$	21
Gambar 4.3. Plot I terhadap V ($v_0\sin(\omega_0t)$) pada MATLAB.....	21
Gambar 4.4. Grafik plot I terhadap V dengan input berupa fungsi sinusoidal \pm $v_0\sin(\omega_0t)$	23
Gambar 4.5. Grafik plot I terhadap V dengan input berupa fungsi sinusoidal $v_0\sin(\omega_0t)$	24
Gambar 4.6. Grafik plot I terhadap V dengan input berupa fungsi sinusoidal $v_0\sin(\omega_0t)$	24
Gambar 4.7. Grafik plot I terhadap V dengan input berupa fungsi sinusoidal $v_0\sin(\omega_0t)$	26
Gambar 4.8. Grafik plot I terhadap V dengan input berupa fungsi sinusoidal $v_0\sin(\omega_0t)$	26

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1.LATAR BELAKANG

Dalam perkembangan teknologi, kebutuhan akan peralatan elektronika yang semakin kecil, cepat, handal dan terintegrasi menjadi prioritas utama. Dengan fabrikasi yang semakin kecil, kinerja divais-divais elektronika dapat ditingkatkan dan biaya produksinya juga semakin murah, sehingga eektivitasnya semakin lebih baik. Sudah menjadi dasar dari sifat manusia dimana selalu menginginkan sesuatu yang jauh lebih baik, lebih praktis, dan lebih handal di dalam kebutuhan hidupnya sehari-hari. Pada tahun 1971, seorang Profesor dari University of California bernama Leon Chua mengumumkan teorinya mengenai memristor dimana dipercayai sebagai komponen dasar elektronika ke empat selain resistor, kapasitor dan induktor. Pada tahun 2008, para peneliti dari HP labs berhasil menciptakan memristor dengan skala nano yang menyerupai konsep dasar yang diterapkan oleh Leon Chua. Memristor yang berukuran skala nano ini, dipercaya mampu menggantikan komponen lainnya sehingga divais elektronika ke depannya dapat menjadi jauh lebih kecil, dan lebih cepat. Sifat dari memristor ini yang sangat menjadi perhatian publik selain dari ukurannya yang kecil, yakni mampu menyimpan memori walaupun tanpa diberi sumber energi. Sifat ini akan sangat berguna dalam dunia komputerisasi sebagai fungsi memori dan proses switch yang cepat. Mengingat memori komputer saat ini bersifat volatile atau tidak memiliki kemampuan untuk menyimpan informasi setelah sumber energi dimatikan. Para peneliti di HP Labs percaya dengan mengembangkan memristor, diyakini mampu menggeser pemakaian D-RAM menjadi memori yang mampu menyimpan informasi walaupun sumber energinya dimatikan. Sehingga pada saat menyalakan komputer nantinya, para pengguna komputer tidak perlu untuk menunggu proses *booting*.

1.2. TUJUAN PENULISAN

Tujuan penulisan skripsi ini adalah menjelaskan konsep dasar dari memristor terutama memristor yang berbahan dasar Titanium Dioksida (TiO_2), menurunkan persamaan fungsi memristor dan menerapkannya di dalam simulasi, membuat animasi sederhana untuk memperjelas konsep kerja dari memristor dan membuktikan bahwa kurva I-V dari Titanium Dioksida (TiO_2) memristor dengan elektroda platina dapat disimulasikan dimana serupa dengan bentuk kurva I-V yang didapat dari hasil eksperimen. Sifat memristansi dari memristor ini akan mampu mendobrak pemikiran lama dalam pembuatan mikrochip, memori dan lainnya yang menjadi dasar dalam pembuatan divais-divais elektronika.

1.3. BATASAN MASALAH

Pada skripsi ini, permasalahan dibatasi pada pengertian konsep dasar Titanium Dioksida (TiO_2) memristor, penurunan persamaan dari memristor dan menggunakannya untuk merancang simulasi dari memristor dimana memristor dianggap ideal tanpa memperhatikan faktor-faktor lainnya, serta membuktikan bahwa kurva I-V dari Titanium Dioksida (TiO_2) memristor dapat dihasilkan serupa dari simulasi yang dilakukan.

1.4. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah :

1. Pendekatan tinjauan pustaka, yaitu dengan melakukan studi literatur dari buku-buku pustaka atau *manual book* serta buku referensi atau *reference book* dan jurnal referensi dari suatu piranti.
2. Pendekatan diskusi dengan pembimbing skripsi, dosen-dosen, serta pihak-pihak terkait yang berkaitan dengan topik bahasan skripsi.
3. Membuat simulasi memristor yang digunakan untuk memperoleh fungsi karakteristik yang serupa dengan hasil experiment.

1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Pada Bab I terdiri dari latar belakang, tujuan, pembatasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan. Bab II menjelaskan tentang dasar-dasar teori

yang berkaitan dengan masalah dalam skripsi, yaitu tentang karakteristik memristor yang memiliki sifat memristansi dimana nilai dari resistansi dari komponen tersebut dapat berubah seiring dengan pemberian sumber energi. Bab III menjelaskan tentang konsep dasar dari Titanium Dioksida (TiO_2) memristor. Bab IV menjelaskan tentang penurunan rumus dan analisis lebih lanjut mengenai kurva I-V dari hasil simulasinya. Bab V menjelaskan kesimpulan dari skripsi ini.



BAB 2

DASAR TEORI MEMRISTOR

2.1. Memristor

Memristor secara formal didefinisikan sebagai elemen dua terminal, flux magnetik (Φ_m) antara kedua terminal tersebut merupakan fungsi dari total jumlah muatan listrik q yang melewati divais ini. Tiap memristor memiliki karakteristik berdasarkan atas fungsi memristansi tersebut yang merupakan perbandingan antara perubahan flux magnetik dengan perubahan muatan. Pada Gambar 2.1 diperlihatkan simbol dari memristor [1].



Gambar 2.1. Simbol Memristor

$$M(q) = \frac{d\Phi_m}{dq} \quad (2.1)$$

Seperti dalam hukum Faraday atas induksi, flux magnetik merupakan integral tegangan terhadap waktu dan muatan merupakan integral arus terhadap waktu. Maka kita dapat menulis kembali fungsi memristansi dalam bentuk yang konvensional [1].

$$M(q(t)) = \frac{d\Phi_m/dt}{dq/dt} = \frac{V(t)}{I(t)} \quad (2.2)$$

Dari persamaan diatas dapat dikatakan secara sederhana bahwa memristansi merupakan hambatan yang tergantung atas arus listrik. Jika $M(q(t))$ nilainya

konstan, maka diperoleh hukum Ohm yakni $R(t) = V(t)/I(t)$. Jika $M(q(t))$ nilainya nontrivial, maka persamaan memristansi tidak ekivalen karena $q(t)$ dan $M(q(t))$ nilainya berubah-ubah berdasarkan waktu. Dengan menyelesaikan persamaan memristansi sebagai tegangan dalam fungsi terhadap waktu didapat [1]

$$V(t) = M(q(t))I(t) \quad (2.3)$$

Persamaan (2.3) menunjukkan bahwa memristansi didefinisikan memiliki hubungan yang linear antara arus listrik dan tegangan listrik, selama arus listrik yang berlaku tidak beragam. Arus AC dapat memberikan fungsi linear dalam sirkuit dengan menginduksi tegangan listrik terukur selama perubahan maksimum dari muatan (q) tidak memberikan perubahan besar terhadap M . Jika tidak ada arus listrik yang melewati memristor maka memristor ini tidak akan berubah atau static. Jika $I(t) = 0$, maka $V(t) = 0$ dan $M(t)$ nilainya konstan. Sifat ini merupakan hal utama dalam memristor yang berperan memberikan efek memory (ingatan/menyimpan data).

Karakteristik konsumsi energi pada memristor menyerupai dari komponen resistor yakni I^2R [7].

$$P(t) = I(t)V(t) = I^2(t)M(q(t)) \quad (2.4)$$

Selama $M(q(t))$ hanya berubah sedikit, seperti dalam AC, memristor akan berfungsi layaknya resistor. Jika $M(q(t))$ meningkat secara drastis, maka konsumsi energi dan arus akan berhenti secara cepat.

2.2. Flux Magnetik pada divais pasif

Dalam teori sirkuit, flux magnetik Φ_m selalu berkaitan dengan hukum induksi dari Faraday, yang dikemukakan bahwa tegangan dalam batas sebagai medan listrik yang diperoleh didalam loop (GGL) sebanding dengan nilai negative dari jumlah flux yang melewati loop tersebut [1]

$$\mathcal{E} = -d\Phi_m/dt \quad (2.5)$$

Pengertian diatas dapat diperluas dengan menganalogikan pada sebuah divais pasif. Jika terdapat sirkuit yang terdiri dari komponen-komponen pasif, maka total flux akan sebanding dengan jumlah flux dari komponen-komponen tersebut. Sebagai contoh, sebuah loop kawat sederhana dengan hambatan yang rendah akan memiliki *flux linkage* yang tinggi pada daerah kerja medannya saat flux yang kecil terinduksi pada arah yg berlawanan. Voltage untuk divais pasif dikaitkan dengan energi yang hilang dari sebuah unit muatan [1]

$$V = d\Phi_m/dt \quad (2.6)$$

$$\Phi_m = \int V dt \quad (2.7)$$

Φ_m sebanding dengan integral dari tegangan jatuh antara 2 titik.

Dua buah konsep yang berlaku diuraikan dibawah ini.

1. Magnetik flux dihasilkan dari sebuah hambatan yang berlawanan arah dari medan yang berlaku pada system atau gaya gerak listrik (GGL). Tanpa menghiraukan hambatan, flux meningkat tanpa ada batasan akibat dari EMF yang bernilai konstan. Flux yang berlawanan arah terinduksi didalam resistor juga harus meningkat secara tak terbatas sehingga jumlahnya tetap terbatas.
2. Respon apapun dari tegangan yang diberikan pada rangkaian dapat dikatakan sebagai flux magnetik.

Komponen pasif memiliki hubungan atas beberapa variabel flux tanpa menyimpan medan magnetik didalamnya. Dari pernyataan tersebut, memristor selalu berlaku serupa seperti halnya resistor. Seperti yang diperlihatkan diatas, anggap tidak ada resistansi negatif, akan terjadi disipasi energi dari EMF yang

berlaku namun tidak memungkinkan untuk mendisipasi medan energi yang tersimpan di dalamnya pada rangkaian sirkuit yang berlaku. Hal ini bertentangan dengan induktor yang bekerja saat medan magnetik menyimpan semua energi yang berasal dari beda potensial yang melewati komponen tersebut, yang nantinya akan melepaskan energi tersebut sebagai GGL di dalam sirkuit [1].

2.3. Pembatasan secara fisik pada $M(q)$

Pemberian tegangan potensial yang bernilai konstan menyebabkan peningkatan pada Φ_m . Sehubungan dengan itu, sumber memori yang tak terbatas atau kuat medan yang tak terbatas dibutuhkan untuk menyimpan sebuah angka saat meningkat tak terkendali [1].

Tiga alternatif yang dapat menghindari ketidakmungkinan fenomena fisik yakni sebagai berikut.

1. $M(q)$ mendekati nol, seperti $\Phi_m = \int M(q) dq = \int M(q(t)) I dt$ tetap berbentuk tetapi tetap berubah-ubah pada nilai yang terus menurun. Pada suatu saat, hal ini akan menyebabkan semacam kuantisasi dan perilaku non ideal.
2. $M(q)$ terjadi berulang, oleh sebab itu $M(q) = M(q - \Delta q)$ untuk semua q dan sebagian Δq , misalnya $\sin^2(q/Q)$.
3. Divais ini memasuki tahap histerisis ketika sejumlah muatan telah berhasil melewati terminalnya, atau dengan kata lain berhenti bertindak sebagai memristor

2.4. Sistem Memristansi

Memristor secara umum dimaksudkan untuk sistem memristansi pada jurnal Leon Chua tahun 1976, dimana sebuah memristor secara matematis merupakan bentuk skalar, sebuah system berbentuk vektor. Sejumlah bentuk variabel tidak bebas, dan biasanya lebih besar dari jumlah terminalnya.

2.5. Operasi sebagai switch

Untuk sebagian memristors, pemberian arus atau tegangan listrik akan memberikan perubahan besar pada nilai resistansinya. Divais yang berperilaku seperti demikian dapat diklasifikasikan sebagai sebuah switch dengan menginvestigasi waktu dan energi yang diperlukan untuk mencapai tahap yang diinginkan pada perubahan resistansinya. Diasumsikan bahwa tegangan yang berlaku tetap bernilai konstan dan menyelesaikan energi disipasi selama satu kali periode switch. Untuk sebuah memristor, untuk menswitch dari R_{on} ke R_{off} dalam waktu T_{on} ke T_{off} , muatannya harus berubah dengan $\Delta Q = Q_{on} - Q_{off}$ [1].

$$E_{\text{switch}} = V^2 \int_{T_{\text{off}}}^{T_{\text{on}}} \frac{dt}{M(q(t))} = V^2 \int_{Q_{\text{off}}}^{Q_{\text{on}}} \frac{dq}{I(q)M(q)} = V^2 \int_{Q_{\text{off}}}^{Q_{\text{on}}} \frac{dq}{V(q)}$$

$$= V\Delta Q \quad (2.8)$$

(pada nilai V yang konstan)

Karakteristik dari power ini berbeda secara fundamental dari sebuah metal oxide semiconductor transistor, yang merupakan divais berbasis kapasitor. Tidak seperti transistor, kondisi terakhir dari memristor dalam bentuk sebuah muatan tidak tergantung pada tegangan bias.

BAB 3

CARA KERJA DARI TITANIUM DIOXIDE (TiO₂) MEMRISTOR

3.1 Konsep Dasar Memristor

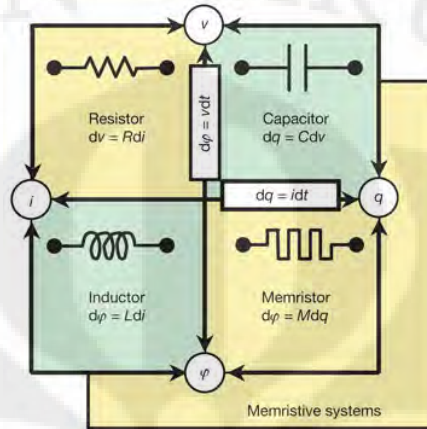
Memristors merupakan kelas komponen pasif dua terminal yang mempertahankan hubungan fungsional antara integral arus dan tegangan terhadap waktu. Fungsi ini disebut sebagai memristansi, dimana dengan kata lain resistansi variabel. Teori memristor telah diformulakan oleh Leon Chua pada tulisannya tahun 1971. Leon Chua mengeksplorasi lebih dalam tentang konsep kesimetrisan antara resistor, inductor, dan kapasitor, serta menyatakan bahwa memristor merupakan komponen dasar yang serupa.

Leon Chua menyimpulkan keberadaan memristors dari hubungan matematis antara komponen dasar. Ke-empat besaran dalam sirkuit (muatan listrik, arus listrik, tegangan listrik, dan flux magnetik) dapat dihubungkan satu sama lainnya dengan enam cara yang berbeda. Dua kuantitas besaran dicakup oleh hukum dasar fisika, dan ketiga lainnya mencakup komponen dasar elektronika (resistor, kapasitor, dan inductor). Kuantitas besaran yang terakhir diajukan oleh Leon Chua sebagai memristor dimana didapat secara murni dari segi matematika. Memristor ini diklasifikasikan sebagai komponen dasar sirkuit berdasarkan oleh hubungan antara arus dan flux magnetik.

Pada Gambar 3.1 diperlihatkan skematik hubungan antara komponen dasar lainnya beserta komponen memristor yang dihubungkan berdasarkan 4 variabel dasar dari suatu rangkaian listrik yakni tegangan listrik, arus listrik, flux magnetik dan muatan listrik.

Pada tanggal 30 April tahun 2008, sebuah tim pada HP Labs mengumumkan perkembangan dari sebuah switching memristor. Dimana dengan mengimplementasikan thin film dari titanium dioksida (TiO₂), switching memristor ini berpedoman pada operasi yang memiliki hubungan linear antar

resistansi dan arus listrik. Divais ini dikembangkan lebih lanjut untuk aplikasi dalam nanoelektronik memori, *computer logic*, dan *neuromorphic computer architectures*.

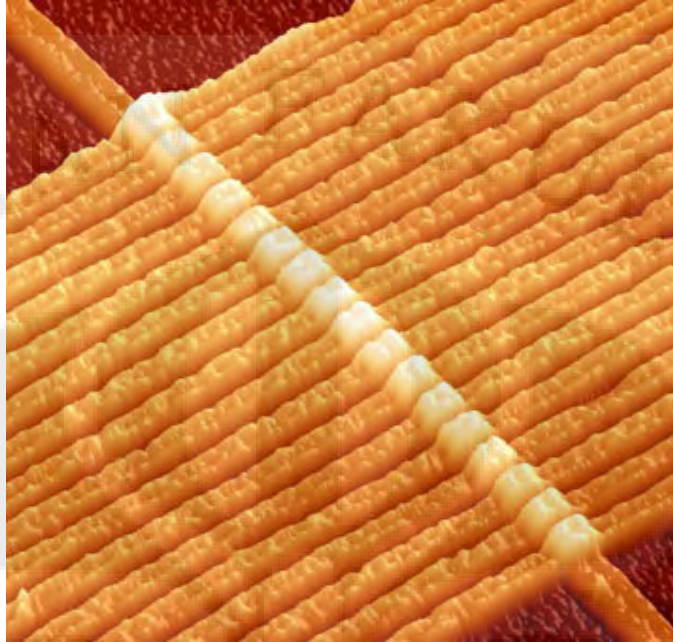


Gambar 3.1. Hubungan antara resistor, kapasitor, induktor, dan kapasitor

3.2 Titanium Dioxide Memristor (TiO_2)

Ketertarikan pada memristor bangkit ketika sebuah versi experiment solid-state dikemukakan oleh R.Stanley Williams dari Hewlett Packard pada tahun 2008. Divais solid-state tidak dapat dibuat sampai perilaku yang tidak biasa dari material pada skala nano dipahami lebih lanjut. Divais ini tidak menggunakan flux magnetik seperti pada teori memristor yang telah dikemukakan sebelumnya, tidak pula menyimpan energi arus seperti yang terjadi pada kapasitor, namun memiliki resistansi yang tergantung pada ingatan dari arus yang melewati divais ini dengan menggunakan mekanisme kimia.

Gambar 3.2 menunjukkan array memristor dimana terdiri dari 17 titanium dioksida yang didoping oksigen dibuat pada Labs HP, yang diambil memakai atomic force microscope. Wire memristor ini memiliki ketebalan sekitar 50nm, atau selebar 150 atom. Arus listrik yang melewati memristor ini akan memindahkan ion oksigen sehingga menyebabkan perubahan secara perlahan dan pasti dalam electrical resistansinya.



Gambar 3.2. Array memristor

Yang membuat memristor ini berbeda dibandingkan dengan komponen dasar lainnya yaitu mampu untuk membawa/menyimpan memori dari masa lalunya. Saat tegangan listrik yang dihubungkan pada sirkuit dilepaskan, memristor ini masih dapat mengingat seberapa banyak tegangan yang telah diberikan serta lamanya waktu saat dihubungkan dengan sumber. Efek inilah yang tidak dapat ditiru oleh kombinasi sirkuit apapun yang terdiri dari resistor, kapasitor, dan inductor, sehingga memristor ini memenuhi syarat sebagai komponen dasar elektronika ditambah bentuk dan besarnya jauh lebih kecil dibandingkan komponen dasar lainnya.

Untuk mempermudah gambaran mengenai memristor, maka dianalogikan perbandingan antara memristor dengan resistor. Analogi klasik paling sederhana untuk resistor yakni digambarkan sebagai sebuah pipa tempat air (arus listrik) akan mengalir melewati pipa tersebut. Lebar dari pipa tersebut dapat disamakan dengan resistansi dari aliran arus listrik (semakin sempit lebar pipanya, semakin besar resistansinya). Resistor yang normal memiliki ukuran pipa yang tak berubah, namun di lain pihak, memristor merubah lebar pipa dengan jumlah air yang mendorong masuk mengalir melewati pipa ini. Jika air didorong masuk,

mengalir pada satu arah tertentu, maka pipa tersebut menjadi semakin lebar (nilai resistansinya mengecil). Namun jika air didorong masuk melalui arah sebaliknya, lebar pipa tersebut akan menyempit (nilai resistansinya bertambah). Dan jika aliran air dihentikan, lebar dari pipa tersebut tidak akan berubah dari saat terakhir air tersebut melewati pipa tersebut, yang berarti memristor mengingat memori terakhir yang diberikan [3].

Aplikasi memristor yang paling menjanjikan yakni sebagai pengganti D-RAM ataupun memori lainnya pada computer. Alasan computer harus me-reboot setiap kali dinyalakan adalah *logic circuit* yang terpasang pada computer ini tidak mampu untuk menyimpan bitsnya setelah computer dimatikan/ sumber tegangannya dimatikan. Namun karena memristor dapat mengingat tegangan, maka tanpa diragukan lagi computer yang menggunakan memristor tidak perlu melakukan reboot lagi.

Divais memristor hasil produk dari HP ini terbuat dari sebuah thin film (50 nm) titaniumdioksida yang berada diantara dua buah elektroda dengan ketebalan 5nm, yaitu yang satu Ti, dan yang lainnya Pt. Bermula dari, dibentuknya 2 layer pada thin film titanium dioksida, dengan salah satu layernya mengalami sedikit depletion pada atom oksigennya. Kekosongan akan oksigen ini berlaku sebagai perantara arus, yang pada daerah yang lebih rendah kadar oksigennya, maka nilai dari resistansi pada daerah ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan daerah yang tidak mengalami depletion. Saat medan listrik diberikan, kekosongan dari oksigen pada depletion layer akan ter-drift yang akan merubah batas antara bagian yang memiliki resistansi tinggi dan pada bagian yang memiliki resistansi rendah. Resistansi sebagai satu kesatuan pada thin film ini tergantung dari berapa banyak arus telah melewati divais ini pada arah tertentu, yang dapat diputar balikkan dengan merubah arah dari arus listrik yang diberikan. Karena divais HP ini menunjukkan *fast ion conduction* maka divais ini dikatakan sebagai nanoionic divais [2].

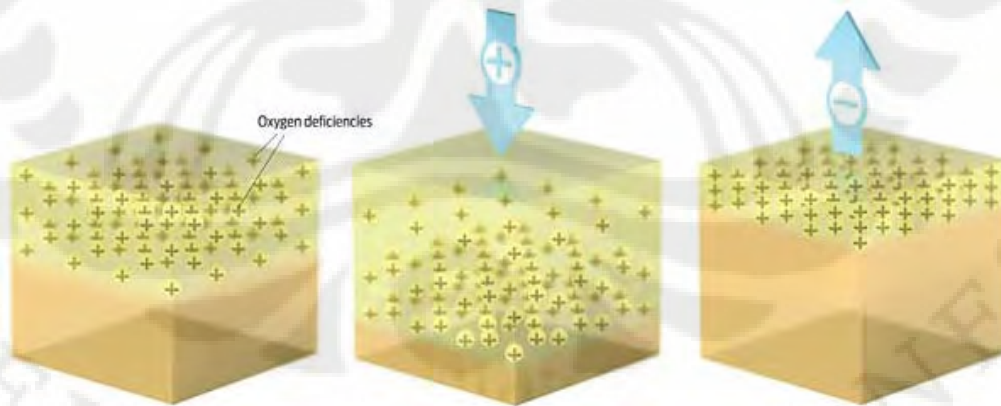
Prilaku memristansi diperlihatkan hanya ketika kedua buah layer, doped layer dan depleted layer berkontribusi pada nilai resistansinya. Ketika arus listrik dengan jumlah tertentu telah melewati kedua terminal memristor ini pada satu arah tertentu yang menyebabkan ion dari oksigen tidak dapat bergerak lebih lanjut, divais ini memasuki tahap histerisis. Divais ini akan berhenti untuk mengintegrasikan $q = \int Idt$ namun lebih memilih menyimpan q pada batas paling atas dan besarnya nilai memristansi M fix. Pada tahap ini akan berlaku sebagai sebuah resistor normal sampai arus listrik yang diberikan arahnya dibalikkan.

R. Staley Williams menemukan memristor yang ideal dengan titanium dioxide (TiO_2). Seperti pada silicon, titanium dioksida merupakan bahan semikonduktor juga, dan murni memiliki nilai resistansi yang tinggi. Namun TiO_2 ini dapat didoped dengan element lainnya untuk membuat bahan TiO_2 sangat konduktif. Dalam TiO_2 , dopan yang diberikan tidak hanya tinggal diam pada medan listrik yang tinggi, mereka berusaha untuk mengikuti arah dari arus yang melewati bahan tersebut (drift). Dengan memberikan tegangan bias pada thin film bahan semikonduktor berupa titanium dioxide yang diberikan dopan pada arah tertentu, akan membuat dopan tersebut bergerak ke arah bahan TiO_2 yang murni pada sisi lainnya sehingga membuat nilai resistansinya berkurang. Dengan memberikan arus pada arah yang berlawanan akan mendorong kembali dopan yang telah bergerak kembali pada tempatnya semula sehingga menyebabkan nilai resistansi dari TiO_2 -nya kembali membesar.

Karakteristik dari sifat memristansi dikontrol dengan mengatur aliran atom-atom oksigen pada layer Titanium Dioksida. Layer TiO_2 yang digambarkan sebagai lapisan yang berwarna coklat pada Gambar 3.3 merupakan bahan yang bersifat isolator atau tidak menghantarkan arus listrik sedangkan Layer TiO_{2-x} yang digambarkan sebagai lapisan yang berisi muatan-muatan positif menunjukkan kehilangan sebagian oksigennya, bersifat konduktif (karena kekosongan oksigen merupakan pendonor elektron, sehingga menyebabkan kekosongan tersebut bersifat sebagai muatan positif. Kekosongan oksigen ini dapat dianalogikan sebagai gelembung udara di dalam sebuah gelas berisi air, hanya saja gelembung

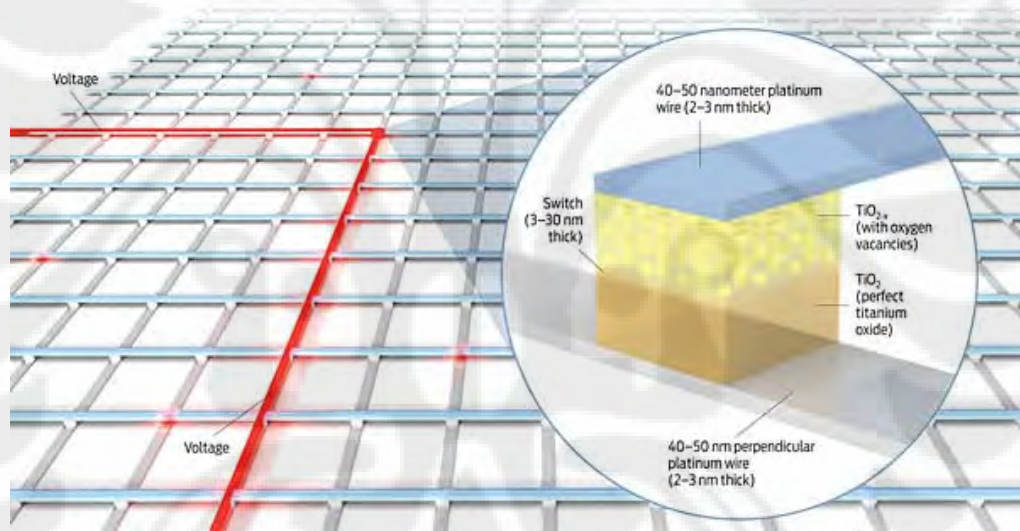
udara tersebut tidak terdorong/mengapung ke atas permukaan air, melainkan dapat kita kontrol, dapat didorong keatas ataupun kebawah sesuai keinginan kita didalam material Titanium Dioksida karena memiliki muatan listrik [2].

Jika tegangan positif diberikan pada elektroda bagian atas dari divais ini, akibatnya elektroda yang sekarang memiliki polaritas positif akan mendorong kekosongan oksigen pada layer TiO_{2-x} atau disebut juga oxygen-deficient titanium dioxide (yang bermuatan positif juga) menuju layer Titanium Dioksida yang murni (TiO_2). Sehingga menyebabkan layer TiO_2 menjadi layer TiO_{2-x} yang bersifat konduktif, sehingga layer TiO_{2-x} bergerak menjadi lebih tebal atau batas antara TiO_2 dan TiO_{2-x} bergerak ke bawah menyebabkan devais itu berada pada kondisi 'on'. Pemberian tegangan negatif akan memberikan efek yang berlawanan sehingga kekosongan oksigen pada layer TiO_{2-x} (yang bermuatan positif juga) menjadi tertarik menuju elektroda bagian atas yang sekarang memiliki polaritas negative, sehingga membuat kekosongan oksigen pada lapisan TiO_{2-x} yang berada pada daerah terbawah kembali terisi oleh atom oksigen sehingga kembali menjadi layer TiO_2 yang murni kembali. Akibatnya ketebalan lapisan TiO_2 kembali meningkat menyebabkan divais tersebut berada pada kondisi 'off'. Skematik konsep kerja memristor seperti ini ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Skema cara kerja memristor

Yang menyebabkan divais switch (memristor) ini special adalah ketika tegangan listrik dimatikan, positif atau negatif, atom-atom oksigennya tidak akan berpindah. Atom-atom tersebut akan tetap tinggal tepat ketika tegangan listrik dimatikan. Sehingga menyebabkan batas antara kedua layer Titanium Dioksida tersebut menjadi beku atau tidak bergerak. Fenomena ini yang membuat memristor mengingat berapa besar dan berapa lama tegangan telah diberikan atau mengingat berapa besar total nilai resistansi di dalam memristor tersebut pada saat terakhir diberikan tegangan. Contoh gambar memristor pengganti *integrated circuit* yang saling dihubungkan pada suatu *crossbar* ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Crossbar Architecture

Aplikasi memori thin film oxides telah menjadi area yang sangat aktif untuk diinvestigasi pada waktu yang cukup lama. IBM mempublikasikan artikel pada tahun 2000 mengenai struktur yang menyerupai divais ini yang telah dideskripsikan oleh R. Stanley Williams. Samsung juga memiliki U.S. patent yang tertahan pada aplikasi beberapa layer okside sebagai switch yang menyerupai aplikasi yang dideskripsikan oleh R. Stanley Williams juga. Williams juga memiliki U.S patent yang tertahan menyangkut perihal tentang konstruksi dari memristor.

Walaupun HP memristor merupakan penemuan besar untuk teori electrical engineering, namun masih belum di demonstrasikan pada operasi dengan kondisi kecepatan dan kepadatan yang sebenarnya. Grafik dari hasil laporan Williams menunjukkan operasi switching hanya pada $\sim 1\text{Hz}$. Walaupun kelihatannya dari kecilnya divais ini yang berdimensi nano, terlihat sepertinya memiliki operasi switching yang cepat, arus carrier yang terjadi di dalam ternyata bergerak dengan sangat lambat, dengan ion mobility sebesar $10^{-10} \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. Sebagai perbandingan, arus drift ion mobility yang diketahui paling cepat terjadi di dalam advance superionic conductors, seperti rubidium silver iodide dengan mobilitas sekitar $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ yang mengkonduksi ion silver pada suhu ruang. Pada bahan semikonduktor, electron dan hole dalam bahan silicon memiliki mobilitas $\sim 1000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, merupakan bahan yang dipakai sebagai figur utama pada transistors [1].

BAB 4

ANALISA PROSES KERJA TITANIUM DIOXIDE (TiO₂) MEMRISTOR BESERTA SIMULASINYA

Seperti yang dijelaskan pada bab 2 mengenai Teori Dasar Memristor maka bentuk matematika yang paling dasar dari sebuah current-controlled memristor untuk analisis sirkuit adalah suatu bentuk differensial [4].

$$V = R(w)i \quad (4.1)$$

$$\frac{dw}{dt} = i \quad (4.2)$$

W merupakan state variabel dari divais dan R merupakan nilai resistansi secara umum yang dipengaruhi oleh kondisi internal dari divais tersebut. Pada kasus ini, state variabelnya hanya arus. Namun ternyata sampai saat ini tidak ada yang dapat memodelkan secara pfisikal persamaan sederhana yang diatas. Pada tahun 1976, Chua dan Kang mengeneralisasikan konsep memristor pada batas kelas dari sistem nonlinear yang bersifat dinamis sehingga disebut sebagai sistem memristansi yang didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut [4]

$$V = R(w,i)i \quad (4.3)$$

$$\frac{dw}{dt} = f(w,i) \quad (4.4)$$

W dapat berupa kumpulan dari state variabel dan R dan f secara eksplisit berupa fungsi dalam waktu

Pada Titanium Dioxide (TiO₂) memristor, bentuk matematika yang memenuhi sifat dari divais ini digunakan persamaan sebagai berikut [4].

$$v(t) = \left(R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) i(t) \quad (4.5)$$

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu_v \frac{R_{on}}{D} i(t) \quad (4.6)$$

Sehingga menentukan formula $w(t)$

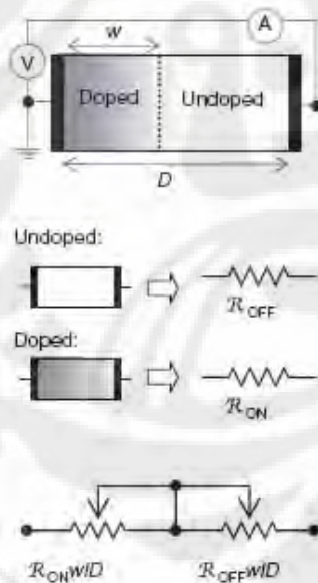
$$w(t) = \mu_v \frac{R_{on}}{D} q(t) \quad (4.7)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (4.7) kedalam persamaan (4.5) kita peroleh karakteristik memristansi untuk system ini untuk $R_{on} \ll R_{off}$, didapatkan

$$M(q) = R_{off} \left(1 - \frac{\mu_v R_{on}}{D} q(t) \right) \quad (4.8)$$

untuk $w(t)$ pada interval $[a, D]$

Gambar 4.1 menunjukan blok simbol memristor yang menggambarkan daerah R_{on} dan R_{off} yang direpresentasikan dibawah ini.



R_{on} merupakan nilai resistansi dari layer TiO_2 ;

R_{off} merupakan nilai resistansi dari layer TiO_{2-x} ;

D merupakan lebar dari memristor;

w panjang daerah R_{on} ;

μ_v merupakan besar rata-rata dari ion mobility;

dan a merupakan lebar minimal dari R_{on} .

Gambar 4.1. Memristor

Untuk mendapatkan nilai $i(t)$ pada divais memristor maka dapat diturunkan sebagai berikut

$$i(t) = \frac{v(t)}{\left(Ron \frac{w(t)}{D} + Roff \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right)}$$

Dengan mensubstitusi persamaan (4.5) dan (4.7) maka diperoleh

$$v(t) = \left(Ron \frac{\mu_v \frac{Ron}{D} q(t) + a}{D} + Roff \left(1 - \frac{\mu_v \frac{Ron}{D} q(t) + a}{D} \right) \right) i(t)$$

$$v(t) = Roff \frac{dq}{dt} + (Ron - Roff) \frac{\left(\mu_v \frac{Ron}{D} q(t) + a \right) dq}{D dt}$$

$$\int v(t) dt = \int \left(Roff + (Ron - Roff) \frac{\left(\mu_v \frac{Ron}{D} q(t) + a \right)}{D} \right) dq$$

$$\int v(t) dt = \frac{D^2}{2(Ron - Roff)\mu_v Ron} \left(Roff + (Ron - Roff) \frac{\left(\mu_v \frac{Ron}{D} q(t) + a \right)}{D} \right)^2 + C$$

Karena pada saat pemberian tegangan listrik, divais berada pada kondisi 'off' sehingga tidak memiliki initial condition atau system tidak menyimpan muatan listrik, maka nilai dari $C = 0$

$$\frac{2(Ron - Roff)\mu_v Ron}{D^2} \int v(t) dt = \left(Roff + (Ron - Roff) \frac{\left(\mu_v \frac{Ron}{D} q(t) + a \right)}{D} \right)^2 + C$$

$$q(t) = \frac{\sqrt{\left(\frac{2(Ron - Roff)\mu_v Ron}{D^2} \int v(t)dt - C\right) - Roff}}{(Ron - Roff)\frac{\mu_v Ron}{D^2}} - \frac{aD}{\mu_v Ron}$$

$$\frac{dq}{dt} = d \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{2(Ron - Roff)\mu_v Ron}{D^2} \int v(t)dt - C\right) - Roff}}{(Ron - Roff)\frac{\mu_v Ron}{D^2}} - \frac{aD}{\mu_v Ron} \right] / dt$$

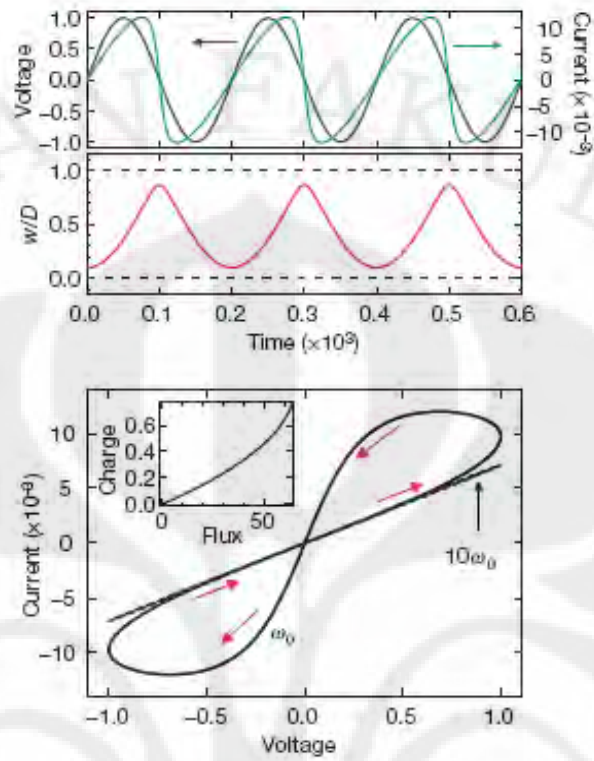
$$i(t) = 2v(t) \left(\frac{2(Ron - Roff)\mu_v Ron \int v(t)dt - C}{D^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

Berlaku untuk nilai w pada interval $[a, D]$ atau $\frac{aD}{\mu_v Ron} \leq \int i(t)dt \leq \frac{D^2}{\mu_v Ron}$

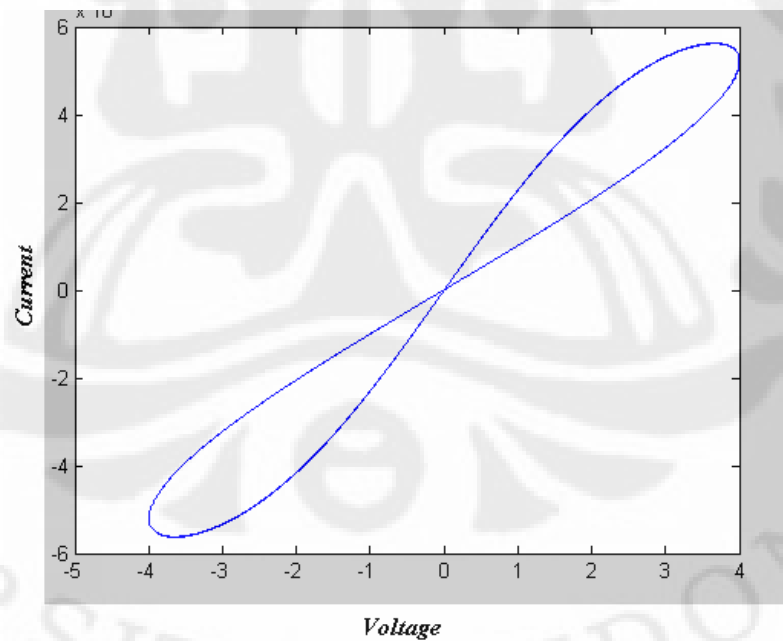
Pada saat $w(t) \leq a$ atau $\int i(t)dt \leq \frac{aD}{\mu_v Ron}$; maka $i(t) = \frac{v(t)}{Roff}$

Sebaliknya, pada saat $w(t) \geq D$ atau $\int i(t)dt \geq \frac{D^2}{\mu_v Ron}$; maka $i(t) = \frac{v(t)}{Ron}$

Pada simulasi, digunakan program Simulink didalam MATLAB yang memudahkan didalam perhitungan mencari nilai $i(t)$ pada fungsi memristor. Pada daerah kerja tegangan Alternative Current (AC) hasil output arus listrik terhadap input tegangan listrik memiliki beberapa karakteristik yang unik.



Gambar 4.2. Grafik plot I terhadap V dengan input berupa fungsi sinusoidal $v_0 \sin(\omega_0 t)$

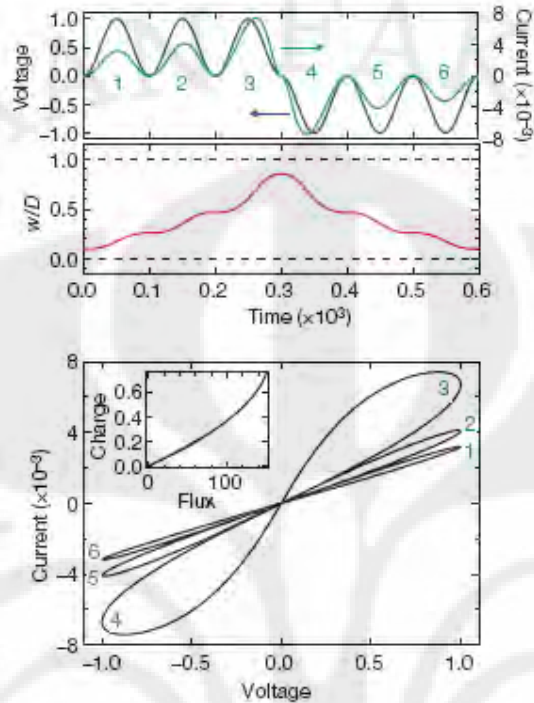


Gambar 4.3. Plot I terhadap V ($v_0 \sin(\omega_0 t)$) pada MATLAB

Dari gambar 4.2, tegangan input dinyatakan dengan garis berwarna biru, hasil output arus listrik dinyatakan dengan garis berwarna hijau.

Plot Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 didapat dari hasil perbandingan antara tegangan (V) terhadap (I), gambar grafik karakteristiknya memiliki bentuk loop yang cukup unik menyerupai bentuk dasi kupu-kupu (bow ties). Bentuk ini didapat ketika pemberian tegangan yang berlaku menciptakan muatan (q) yang melewati divais, besarnya nilai w/D berubah-ubah di antara 0 ~ 1. Akibatnya besar dari nilai M(q) tidak pernah mencapai Ron atau Roff. Hal ini dapat dilihat dari grafik w/D terhadap domain waktu di atas. Grafik bentuk double loops seperti ini akan selalu didapat selama sistem berada pada regima memristansi. Semakin tinggi frekuensinya artinya semakin $\ll \omega_0$ yang diberikan pada tegangan input, bentuk grafik double loops diatas akan semakin menyempit sehingga pada suatu saat pada kondisi frekuensi yang sangat tinggi hasil grafik perbandingan antara V terhadap I akan membentuk garis lurus. Grafik plot I-V pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 didapat jika nilai perbandingan amplitudo (a) dan frekuensi (f) dari sumber tegangan listrik berupa $a \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$ harus memenuhi syarat :

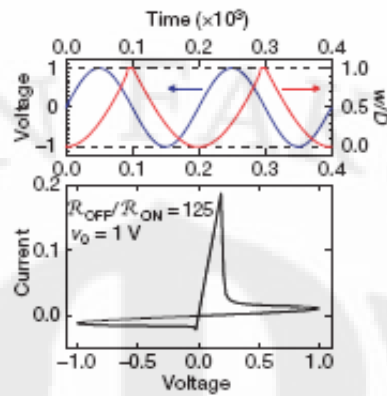
$$D^2 \frac{(2R_{off} + (R_{on} - R_{off}))}{2} > \frac{a}{\pi f} \quad (4.10)$$



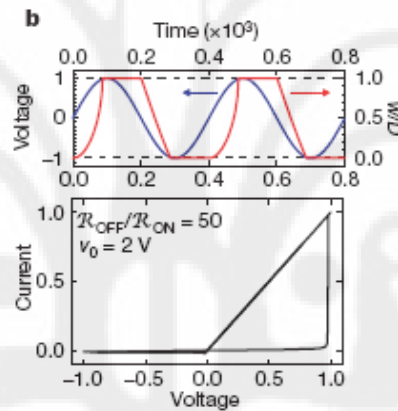
Gambar 4.4. Grafik plot I terhadap V dengan input berupa fungsi sinusoidal $\pm v_0 \sin^2(\omega_0 t)$

Dari gambar 4.4 di atas, tegangan input dinyatakan dengan garis berwarna biru, hasil output arus listrik dinyatakan dengan garis berwarna hijau.

Dapat kita lihat bentuk karakteristik lainnya antara tegangan listrik terhadap arus listrik dengan input tegangan berupa $\pm v_0 \sin^2(\omega_0 t)$. Sama seperti pada grafik sebelumnya, besarnya w/D berada diantara nilai $0 \sim 1$ atau sistem selalu berada pada regima memristansi. Akibat dari w merupakan fungsi dari waktu, sehingga sebelum w berhasil mencapai nilai maximum yakin D , dibutuhkan waktu minimal (t_0) sebesar $2\pi / \omega_0 \equiv D^2 / \mu_v v_0$ sebelum sistem memasuki tahap histerisis atau kondisi saat nilai $M(q)$ tidak berubah lagi. Akibatnya magnitude dari arus listrik terlambat mengimbangi tegangan input menyebabkan hasil dari perbandingan V terhadap I menjadi seperti diatas.



Gambar 4.5. Grafik plot I terhadap V dengan input berupa fungsi sinusoidal $v_0 \sin(\omega_0 t)$



Gambar 4.6. Grafik plot I terhadap V dengan input berupa fungsi sinusoidal $v_0 \sin(\omega_0 t)$

Dari gambar grafik 4.5 dan 4.6 di atas terlihat kurva I vs V yang berbeda dibandingkan kurva-kurva sebelumnya, dimungkinkan terjadi dalam divais memristor. Batas atas dari kurva I vs V diperoleh ketika tegangan input bergerak negatif atau saat tegangan mengecil dibandingkan ketika mencapai nilai maximumnya. Mengakibatkan sifat nilai differential resistansinya bergerak secara dynamical negatif. Efek dinamis ini merupakan hasil dari ketergantungan atas perubahan muatan di dalam resistansinya, dan dapat diidentifikasi dari pengaruh atas besar frekuensi dari fungsi tegangan sinusoidal.

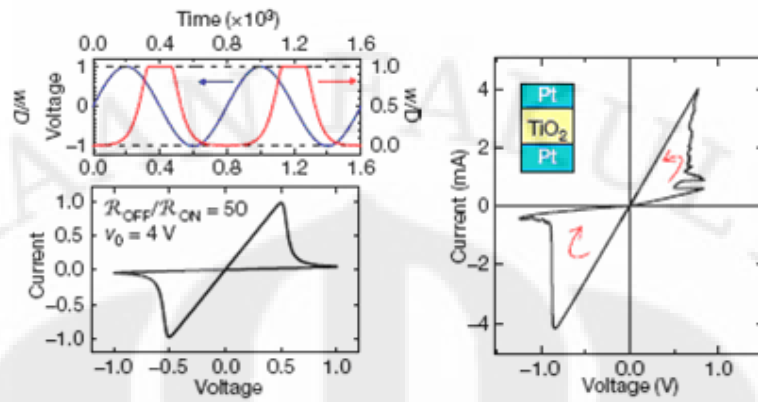
Sebagai contoh, dari grafik 4.6, dengan memperbesar magnitude dari tegangan input sebanyak 2x didapatkan fungsi proses switching yang monoton terhadap

arus. Efek perubahan memristor dari kondisi 'off' ke kondisi 'on' terjadi secara dinamik. Waktu yang dibutuhkan untuk mengubah divais dari kondisi 'off' ke kondisi 'on' ketika diberikan tegangan positif ($v+$) saat divais berada pada kondisi

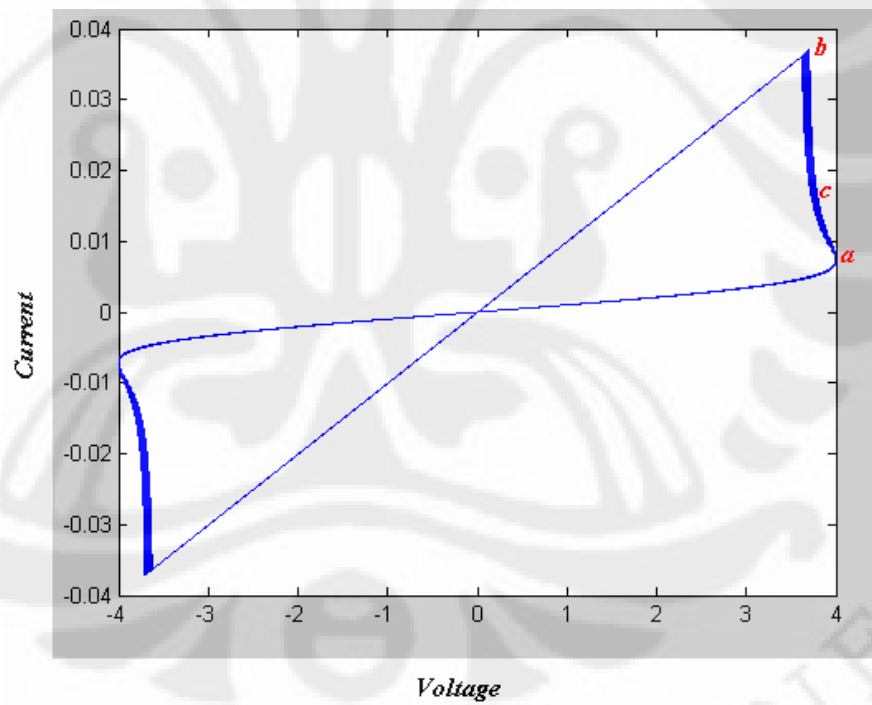
'off' dibutuhkan waktu sebesar $\sim \frac{D^2 R_{off}}{(2\mu_{v+}) R_{on}}$.

Divais ini akan selalu berada pada kondisi 'on' selama tegangan positif berlaku pada sistem, namun hanya dengan tegangan bias negatif yang kecil mampu mengubah kondisi divais tersebut pada kondisi 'off' [4].

Grafik Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 terjadi karena nilai w/D berubah-ubah dengan nilai maximum mencapai 1 dan minimum mencapai 0. Akibat dari lebar divais memristor yang minimum pada titik 0 dan maximum pada besaran D , akibatnya walaupun nilai i terus meningkat, besar w tidak dapat melampaui D begitu pula sebaliknya saat nilai i terus menurun, besar w dari nilai w tidak dapat kurang dari 0. Sehingga ketika nilai w mencapai besar D atau 0, fungsi dari memristor berubah menjadi fungsi linear atau sifat memristor menjadi variabel resistor biasa. Dari plot nilai tegangan terhadap arus pada kedua kurva diatas, terlihat bahwa bentuk dari kurva 4.5 dan 4.6, berubah menjadi bentuk segitiga dengan hampir tidak ada nilai negatif dari arus listriknya. Bentuk segitiga ini diperoleh akibat dari ketika nilai tegangan input mencapai maximum, besarnya nilai w pun bersamaan mencapai nilai maximum, sehingga besar nilai dari $M(q)$ menjadi R_{on} yang menyebabkan arus melonjak naik. Ketika tegangan listrik berubah dari nilai positif menjadi negatif, besar nilai w pun ikut menurun menyebabkan besar $M(q)$ meningkat secara drastis sehingga arus keluaran dari memristor menjadi sangat kecil. Sehingga plot dari besar V terhadap I menjadi seperti yang diperlihatkan gambar grafik 4.5 dan 4.6.



Gambar 4.7. Grafik plot I terhadap V dengan input berupa fungsi sinusoidal $v_0 \sin(\omega_0 t)$



Gambar 4.8. Plot I terhadap V ($v_0 \sin(\omega_0 t)$) pada MATLAB

Grafik Gambar 4.8 merupakan bentuk karakteristik plot V terhadap I dari hasil experimental divais titanium dioxide dengan elektrode platina. Bentuk

tersebut didapat juga dari hasil plot simulasi menggunakan simulink. Bentuk ini didapat akibat ketika tegangan listrik memasuki fase negatif, nilai w/D masih berada pada nilai maximum. Sehingga arus listrik tetap muncul pada fase negatif. Pada gambar grafik diatas, titik a merupakan titik nilai tegangan listrik yang mencapai nilai maximum namun arus listriknya belum mencapai nilai maximum. Pada titik b, menunjukkan ketika nilai arus listrik mencapai nilai maximumnya ketika tegangan listrik nilainya mulai berkurang ($>90^\circ$). Titik c menunjukkan ketika w/D meningkat hampir mencapai nilai maximum, saat grafik V terhadap t berpotongan dengan grafik w/D terhadap t . Sehingga didapatkan bentuk plot V terhadap I yang menyerupai bowtie. Untuk mendapatkan bentuk kurva $I-V$ diatas maka perbandingan nilai amplitudo (a) terhadap frekuensi (f) dari sumber tegangan sumber tegangan listrik berupa $a \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$ harus memenuhi syarat :

$$D^2 \frac{(2R_{off} + (R_{on} - R_{off}))}{2} \leq \frac{a}{\pi f} < 2D^2 \frac{(2R_{off} + (R_{on} - R_{off}))}{2} \quad (4.11)$$

BAB 5

KESIMPULAN

1. Konsep kerja dari memristor yang dapat menyimpan memori dihasilkan akibat dari pergerakan ion-ion oksigen di dalam material Titanium Dioxide (TiO_2) yang dikendalikan dengan pemberian sumber tegangan listrik dengan magnitud dan polaritas tertentu serta lamanya tegangan diberikan.
2. Hasil dari penurunan rumus didapatkan nilai dari arus listrik pada divais memristor adalah:

$$i(t) = 2v(t) \left(\frac{2(R_{on} - R_{off}) \mu_v R_{on} \int v(t) dt - C}{D^2} \right)^{\frac{1}{2}} ; \text{selama } w \text{ berada pada}$$

interval $[a, D]$

3. Daerah kerja histerisis loop kurva I-V yang menyerupai bentuk dua oval didapatkan selama nilai perbandingan amplitudo (a) terhadap frekuensi (f) dari sumber tegangan listrik AC berupa $a \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$ memenuhi:

$$D^2 \frac{(2R_{off} + (R_{on} - R_{off}))}{2} > \frac{a}{\pi f}$$

4. Daerah kerja histerisis loop kurva I-V yang menyerupai bentuk *bowtie* didapatkan selama nilai perbandingan amplitudo (a) terhadap frekuensi (f) dari sumber tegangan listrik AC berupa $a \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$ memenuhi:

$$D^2 \frac{(2R_{off} + (R_{on} - R_{off}))}{2} \leq \frac{a}{\pi f} < 2D^2 \frac{(2R_{off} + (R_{on} - R_{off}))}{2}$$

5. Bentuk kurva I-V dari Titanium Dioxide (TiO_2) memristor yang menggunakan elektroda Platina dapat disimulasikan dimana serupa dengan bentuk kurva I-V yang didapat dari hasil eksperimen.

REFERENSI

- [1] *Wikipedia*. Memristor. 15 Febuari 2009.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Memristor>
- [2] *R. William, Stanley*. How We Found the Missing Memristor. 3 April 2009
<http://www.spectrum.ieee.org/dec08/7024>
- [3] __. Memristor FAQ. 2 Maret 2009.
http://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/memristor_faq.html
- [4] *B. Strukov, Dmitri, et.al.* 1 Mei 2008. The missing memristor found. Nature Publishing Group.
- [5] __. Memristor found: HP Labs proves fourth integrated circuit element. 24 Febuari 2009.
<http://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/memristor.html>
- [6] *R. William, Stanley*. The Mysterious Memristor. 24 Febuari 2009.
<http://www.spectrum.ieee.org/may08/6207>
- [7] __. Demystifying the memristor: Proof of fourth basic circuit element could transform computing. 8 Maret 2009.
<http://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/memristor.html>

Lampiran A. Blok Diagram Simulasi Titanium Dioksida (TiO_2) Memristor