



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Yudi Darma

**PENGEMBANGAN STRUKTUR NANO DAN
MATERIAL MAJU UNTUK MEDIA PENYIMPAN
DATA DAN DIVAIS MULTIFUNGSI**

10 Juli 2021
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
10 Juli 2021

Profesor Yudi Darma

**PENGEMBANGAN STRUKTUR NANO DAN
MATERIAL MAJU UNTUK MEDIA PENYIMPAN
DATA DAN DIVAIS MULTIFUNGSI**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: SPENGEMBANGAN STRUKTUR NANO DAN MATERIAL MAJU
UNTUK MEDIA PENYIMPAN DATA DAN DIVAIS MULTIFUNGSI
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 10 Juli 2021.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis

Yudi Darma

PENGEMBANGAN STRUKTUR NANO DAN MATERIAL MAJU UNTUK
MEDIA PENYIMPAN DATA DAN DIVAIS MULTIFUNGSI
Disunting oleh Yudi Darma

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2021

viii+60 h., 17,5 x 25 cm

ISBN 978-602-6624-48-2

1. Fisika Material Elektronik 1. Yudi Darma

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT, yang atas berkat dan rahmatNya, saya dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Penghargaan dan ucapan terima kasih ditujukan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, yang atas perkenannya saya dapat menyampaikan orasi ilmiah pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB ini dengan judul **“Pengembangan struktur nano dan material maju untuk media penyimpan data dan divais multifungsi”**. Topik Orasi ini salah satu bagian penelitian yang dikembangkan pada kelompok keahlian Fisika Material Elektronik. Saya sampaikan juga ucapan terima kasih kepada rekan-rekan dosen di lingkungan Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, terutama dari kelompok keahlian fisika material elektronik. Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tinggi juga disampaikan kepada seluruh anggota dan alumni *lab Quantum Semiconductor and Devices*, Prodi Fisika FMIPA, ITB. Terakhir, juga tidak lupa disampaikan terima kasih untuk keluarga tercinta, Rena, Ryu dan Rhean atas dukungannya selama ini, serta orang tua dan seluruh keluarga besar tercinta. Semoga tulisan ini dapat menambah wawasan baru dan menjadi inspirasi bagi para pembaca.

Bandung, 10 Juli 2021

Yudi Darma

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
SINOPSIS	vii
1. PENDAHULUAN	1
2. DIVAIS MEMORI BERBASIS TITIK KUANTUM SILIKON	4
3. PENGEMBANGAN LOGAM OKSIDA UNTUK APLIKASI DIVAIS MULTIFUNGSI	24
4. PROSPEK KE DEPAN	32
5. PENUTUP	34
6. UCAPAN TERIMA KASIH	37
DAFTAR PUSTAKA	38
CURRICULUM VITAE	45

SINOPSIS

Pada Buku ini diulas kegiatan penelitian yang sudah dilakukan serta hasil-hasil yang sudah diperoleh berkaitan dengan pengembangan struktur nano dan material maju. Hasil penelitian ini akan dikaitkan secara langsung dengan potensi aplikasinya untuk media penyimpan data dan divais yang memiliki fungsi yang beragam atau juga dikenal dengan divais multifungsi.

Pada bagian awal akan dibahas secara umum perkembangan dan tren teknologi serta kaitannya dengan kebutuhan penelitian dalam bidang material nano dan material maju. Kemudian akan diceritakan penelitian dan capaian yang sudah diperoleh dengan memfokuskan bahasan kepada struktur nano khususnya tentang titik kuantum (*quantum dot*). Potensi aplikasi titik kuantum ini untuk divais media penyimpan data akan dipaparkan secara khusus, terutama konfigurasi divais yang memanfaatkan titik kuantum berbasis *silicon*. Kontribusi penelitian dan keilmuan dalam bidang terkait juga akan diuraikan secara ringkas.

Pada bagian kedua dalam buku ini juga akan dibahas kegiatan dan hasil penelitian terbaru berkaitan dengan struktur material maju terutama yang melibatkan bahan berbasis logam oksida. Sifat-sifat baru dari bahan akan dielaborasi dan dikaitkan dengan potensi aplikasinya untuk divais multifungsi. Di sini sifat-sifat bahan berkaitan dengan struktur, optik, elektronik dan sifat magnetik akan dibahas dan didiskusikan secara

ringkas. Pemahaman yang baik terhadap sifat-sifat bahan ini akan membuka peluang untuk mendapatkan fungsi baru dari material-material yang sudah dipelajari sebelumnya. Sebagai contoh, potensi fungsi baru dari material ZnO akan diulas secara khusus serta akan diperkenalkan juga beberapa potensi aplikasinya untuk divais multifungsi dimasa yang akan datang.

Setelah memaparkan kontribusi keilmuan pada pokok bahasan buku ini, pada bagian selanjutnya akan diceritakan sedikit tentang prospek penelitian ini kedepannya. Pada bagian akhir, buku ini ditutup dengan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang sudah ikut membantu kegiatan penelitian ini diikuti dengan daftar pustaka dan curriculum vitae penulis.

PENGEMBANGAN STRUKTUR NANO DAN MATERIAL MAJU UNTUK MEDIA PENYIMPAN DATA DAN DIVAIS MULTIFUNGSI

1. PENDAHULUAN

Perkembangan sains dan teknologi berjalan begitu cepat seiring dengan penemuan-penemuan penting yang ditandai dengan munculnya produk dan barang yang menunjang kehidupan manusia. Jika kita menengok ke belakang, di era tahun 1980an kita dikenalkan dengan istilah-istilah yang berhubungan dengan “gen” dan “turbo” yang menunjukkan ukuran terkecil dan gambaran kecepatan yang ada di jaman itu. Kemudian di awal tahun 1990 kita familiar dengan kata-kata “holo”, “cyber” dan “micro” yang menjadi penanda kemajuan teknologi di waktu itu. Kita cukup dekat dengan istilah-istilah seperti holography, cyber-geography, microbiologi atau microelectronic. Kemudian setelah ramai dengan munculnya era internet sekitar tahun 1995 dengan sebutan yang berakhiran “dot com” (.com), pada awal tahun 2000 kita diperkenalkan dengan boomingnya penggunaan kata-kata dengan awalan “nano”. Kata nano dituliskan dengan ukuran raksasa dan tampil secara rutin dalam berbagai media, baik cetak maupun elektronik. *Nanoscale, nanotechnology, nanomaterial, nanoelectronics, nanocolloid, nanoprinting, ipodnano* dan seterusnya yang tidak akan habisnya. Awal tahun 2000 ini semakin menegaskan bahwa kehidupan kita akan sangat berdekatan dengan dunia

nano. Sekarang, perkembangan teknologi nano telah mengantarkan kita ke area yang lebih baru dimana telah banyak dihasilkannya material dan divais cerdas (*smart material and devices*), *artificial intelligent* (AI), *internet of thing* (IoT) atau era *big data*.

Kemajuan teknologi di atas tidak lepas dari kontribusi kemajuan dan perkembangan ilmu dan teknologi material. Pada tahun 1950an, mungkin kita bisa membedakan dengan mudah ranah masing-masing ilmu dasar seperti halnya fisika, biologi dan kimia. Disaat itu kemajuan ilmu fisika masih ditandai dengan transistor dalam bentuk tabung elektron yang ukurannya masih dalam orde makro, kemudian dengan perkembangan bidang fisika kuantum, tabung elektron tadi dapat berubah menjadi divais yang jauh lebih kecil dalam bentuk transistor effect medan (FET) yang saat ini ukurannya sudah berorde nanometer. Begitu juga untuk ilmu biologi, yang tadinya masih bermain diranah sel dengan ukuran di bawah beberapa milimeter, saat ini sudah mulai masuk ke ranah biologi moleculer dengan ukuran pada area nanometer pula. Sedangkan ilmu kimia dari dulu memang sudah bermain di wilayah atom bahkan subatom di orde dibawah nanometer.

Pengelompokan ilmu dasar di atas menjadi mulai tidak terbatas dikala kita sudah memasuki area nanometer. Saat ini piranti elektronik dan alat pendukung yang kita gunakan sudah merupakan divais yang lahir dari bidang keilmuan yang inter-, multi- dan transdisiplin. Perkembangan ilmu dan teknologi serta kebutuhan divais modern sudah

memaksa kita untuk melakukan eksploitasi secara terintegrasi prinsip-prinsip biologi, sifat-sifat kimia dan hukum-hukum fisika. Hal ini yang mengantarkan kita untuk dapat menghasilkan piranti dan divais yang multifungsi.

Satu dekade lalu kita masih memiliki dan menggunakan alat dan piranti elektronik dengan fungsi yang terpisah. Sebut saja kamera dan video untuk merekam photo dan peristiwa, jam tangan, televisi dan tape dan cd/kaset player, telpon, PDA, senter, komputer dan seterusnya dengan fungsinya masing-masing. Juga terdapat sensor gula darah, sensor sidik jari, pemantau detak jantung dan lain sebagainya. Ada belasan bahkan puluhan alat yang selalu ada disekitar kita. Namun saat ini, kesemuanya itu sudah mulai dapat tergantikan dengan satu piranti saja yang kita kenal dengan divais dengan fungsi *ubiquitous* berupa smart phone yang selalu kita kantongi sehari-hari. Era *ubiquitous* ini merupakan suatu pertanda bahwa kita sudah masuk ke era divais yang multifungsi. Era ini tidak lepas dari perkembangan dan kemajuan ilmu dan teknologi material.

Selain peran ilmu dan teknologi material pada divais fungsional seperti yang diulas di atas, bidang ini juga memberikan kontribusi yang penting pada bidang energi baru dan terbarukan. Seperti halnya material energi pada solar sel, batere, fuel cell, thermoelektrik dan lain sebagainya.

Jika kita boleh memilih isu-isu terpenting yang memiliki tantangan terbesar dalam beberapa tahun kedepan, maka dapat kita pilih empat

masalah utama, yaitu: (1) ketersediaan air bersih yang layak untuk dikonsumsi, (2) pengentasan kelaparan, (3) Internet of things atau IoT, dan (4) ketersediaan energi yang bersih dengan harga terjangkau. Pada kesempatan ini akan coba diulas dua hal terakhir yang dikaitkan dengan ilmu dan teknologi material nano. Lebih khusus lagi akan dibahas upaya pengembangan media penyimpan dalam mendukung IoT serta mencari formulasi terbaru untuk bidang energi terutama dalam kaitannya dengan divais multifungsi. Pada bagian pertama buku ini akan dipaparkan upaya yang sudah dilakukan untuk mewujudkan divais memori berbasis titik kuantum (*quantum dot*) yang lebih handal, minim konsumsi energi serta memiliki kinerja yang lebih unggul dari sistem divais memori yang ada sebelumnya. Titik kuantum yang akan digunakan adalah titik kuantum berbasis bahan silikon. Pada bagian kedua akan dipaparkan upaya dalam pengembangan sistem material untuk aplikasi energi baru terbarukan yang dalam waktu bersamaan dapat diarahkan kepada divais multifungsi. Bagian kedua ini akan banyak menggunakan bahan logam oksida sebagai media eksplorasinya.

2. DIVAIS MEMORI DENGAN TITIK KUANTUM BERBASIS SILIKON

Titik kuantum (*quantum dot*) sudah mulai marak diteliti dari awal tahun 1990an (Ohnesorge, 1996) dan ditahun 2006 juga disebutkan bahwa penelitian yang berkaitan dengan titik kuantum ini merupakan salah satu

bidang dari lima bidang terpopuler dalam fisika (Giles, 2006). Secara umum, titik kuantum (*quantum dot*) adalah semikonduktor berukuran nanometer yang diisolasi secara tiga-dimensi, biasanya berukuran antara 1-100nm. Ukuran ini merupakan orde dari panjang gelombang sebuah elektron. Titik kuantum biasanya dibangun dari bahan semikonduktor dari bermacam-macam tipe, seperti silikon (Si), germanium (Ge), CdTe, Si/Ge, indium galium arsenide (InGaAs), dan masih banyak lagi. Titik kuantum dapat berbeda dalam ukuran, susunan dan bentuknya yang akan menentukan karakteristik dan sifatnya. Titik kuantum dapat dibuat untuk tujuan yang berbeda dengan menggunakan metode fabrikasi yang berbeda pula. Ukuran dan bentuk titik kuantum sangat berhubungan dengan jumlah elektron yang dapat disimpannya. Titik kuantum dapat memiliki jumlah elektron bebas yang bervariasi, dari satu sampai beberapa ratus elektron tergantung dari ukurannya, hal ini juga dikenal dengan definisi efek ukuran kuantum (*quantum size effect*). Karakteristik fisis titik kuantum menunjukkan kemiripan dengan perilaku natural yang terdapat pada sistem kuantum dalam sebuah atom. Seperti halnya atom, level energi dalam sebuah titik kuantum menjadi terkuantisasi akibat pengurungan elektron. Berbeda dengan atom, titik kuantum dapat dengan mudah dihubungkan dengan *probe* seperti elektroda dan karenanya sangat tepat digunakan sebagai sarana dan alat bantu untuk mempelajari sifat sistem yang menyerupai atom. Telah banyak fenomena menarik yang dapat diukur dan dipelajari pada struktur titik kuantum

dalam beberapa tahun terakhir ini.

Saat ini struktur titik kuantum khususnya titik kuantum silikon (Si) telah digunakan dan terus dikaji untuk membangun divais dengan fungsi baru, seperti dioda terobosan resonansi (*resonance tunneling diodes*) [Yuki, *dkk.*, 1995; Fukuda, *dkk.*, 1997], divais transpor satu-dimensi (*1-D transport devices*) [Morimoto, *dkk.*, 1996] dan divais memori titik kuantum (*quantum dot memory devices*) [Tiwari, *dkk.*, 1996; Likharev, 1999], [Shi, *dkk.*, 1998; K.Yano, *dkk.*, 1999; King, *dkk.*, 2001; Ohba, *dkk.*, 2002]. Isu krusial untuk aplikasi divais dengan efek kuantum pada temperatur ruang adalah fabrikasi struktur titik kuantum yang tanpa cacat dengan ukuran ~ 3 nm, seperti yang telah diprediksi dari kuantisasi energi dan/atau energi interaksi Coulomb.

Divais memori MOSFETs (*Metal-oxide-semiconductor field-effect transistors*) berbasis titik kuantum silikon diprediksi sebagai aplikasi yang paling menjanjikan untuk sirkuit terintegrasi dimasa kini. Pada memori jenis ini, Si nano-kristal ditanamkan dalam lapisan oksida (SiO_2), kemudian injeksi muatan terhadap Si nano-kristal dilakukan melalui penerobosan langsung dan sebagai hasilnya potensial ambang divais menjadi bergeser. Divais memori berbasis titik kuantum Si dapat beroperasi pada tegangan yang lebih rendah dibandingkan dengan memori flash konvensional karena lapisan dielektrik terobosan yang lebih tipis mengijinkan probabilitas terobosan yang lebih tinggi. Hal ini juga didukung oleh jarak atau spasi antara titik kuantum yang menekan

hilangnya muatan melalui jalur lateral, selain hemat energi hal ini juga diharapkan dapat menghasilkan waktu penyimpanan yang lebih panjang [Hanafi, *dkk.*, 1996]. Ini juga memberikan keuntungan untuk meningkatkan waktu pakai divais karena beroperasi pada tegangan yang rendah. Lebih jauh lagi, divais memori yang menggunakan titik kuantum diharapkan memiliki kehandalan yang lebih tinggi. Harapan ini muncul dari jumlah media penyimpan muatan (kapasitor) yang terbentuk pada divais memori akibat kehadiran titik kuantum. Pada memori divais konvensional hanya terdapat satu kapasitor untuk setiap sel memori, namun pada divais memori yang menggunakan gerbang mengambang berupa titik kuantum terdapat lebih dari $\sim 10^{11}$ kapasitor tiap cm^2 yang sebanding dengan jumlah titik kuantum per luas area. Oleh karenanya, jika terjadi kebocoran salah satu kapasitor, kita masih memiliki kapasitor lain dalam jumlah yang sangat besar pada divais bersangkutan, sehingga divais secara keseluruhan tetap dapat berfungsi dengan baik. Berikut pada gambar 1 ditayangkan ilustrasi yang memperlihatkan daftar dan karakteristik beberapa jenis divais memori yang ada saat ini.

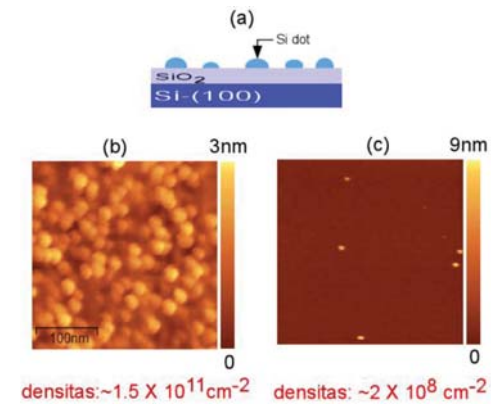
	Conventional Memory		Quantum Dot Memory			
	DRAM	Flash	SET	Nano-flash Multi-dot	Single-dot	Yano-type
device structure						
read time	~6ns	~6ns	1ns	~10ns	~10ns	~20µs
write time	~6ns	1ms	1ns	~100ns	<1µs	~10µs
erase time	<1ns	~1ms	<1ns	~1ms	<1ms	~10µs
retention time	250ms	~10years	~1s	~1week	~5s	~1day
endurance cycles	infinite	10 ⁶	infinite	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁷
operation voltage	1.5V	10V	1V	5V	10V	15V
voltage for state inversion	0.2V	3.3V	<0.1V	0.65V	0.1V	0.5V
electron number to write bit	10 ⁴	250	1 (excluding no to change gate potential)	10 ³	1 (excluding no to change gate potential)	2 (excluding no to change gate potential)
cell size	8.5 F ² /bit	9 F ² /bit	9-12 F ² /bit	9 F ² /bit	9 F ² /bit	2 F ² /bit

Gambar 1. Perbandingan beberapa divais memori disertai parameter dan kinerja masing-masing divais.

2.1 Divais Memori dengan Titik Kuantum Silikon (Si) sebagai Gerbang Mengambang

2.1.1. Titik Kuantum Silikon

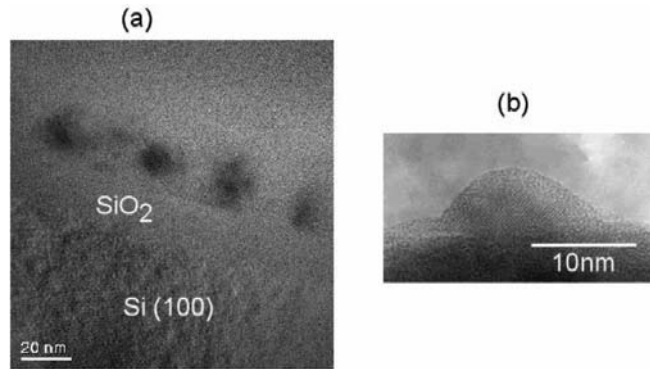
Titik kuantum Si dapat digunakan sebagai gerbang mengambang dalam divais penyimpanan data atau disebut juga divais memori. Penumbuhan titik kuantum Si dapat dilakukan dengan bermacam teknik. Untuk aplikasi divais memori dipilih teknik penumbuhan menggunakan *low pressure chemical vapor deposition* (LPCVD) agar didapatkan hasil yang optimal tanpa adanya kontaminasi dan efek *charging* saat proses fabrikasi.



Gambar 2. (a) skema penampang titik kuantum Si diatas lapisan tipis SiO₂, citra *atomic force microscopy* (AFM) (b) dari titik kuantum Si di atas SiO₂ dengan densitas tinggi; dan (c) dengan densitas rendah menggunakan parameter penumbuhan yang sama dengan (a) namun tanpa proses pembentukan ikatan Si-OH di atas permukaan SiO₂

Proses penumbuhan titik kuantum Si dapat dikontrol dengan mengatur beberapa parameter seperti halnya temperatur, tekanan serta waktu penumbuhan. Proses penyiapan dan modifikasi permukaan tempat tumbuhnya titik kuantum Si juga merupakan faktor yang sangat penting, hal ini dapat dilakukan dengan melakukan beberapa perlakuan kimiawi terhadap permukaan tempat titik kuantum akan ditumbuhkan [Darma,2001], [Darma, 2009].

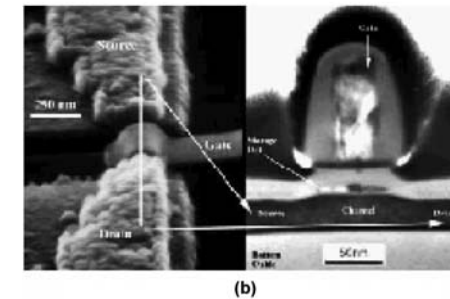
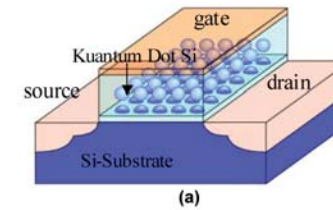
Ukuran titik kuantum silikon yang diharapkan berkisar antara 3-5 nm dengan ketebalan oksida kontrol 7-10 nm. Beberapa citra *atomic force microscopy* (AFM) dan *tunneling electron microscopy* (TEM) untuk titik kuantum silikon ditampilkan pada Gambar 2 dan 3 [Y.Darma (a), dkk, 2002].



Gambar 3. Citra tunneling electron microscopy (TEM) untuk titik kuantum Si (a) dan citra TEM dengan resolusi tinggi yang memperlihatkan individual titik kuantum Si (b).

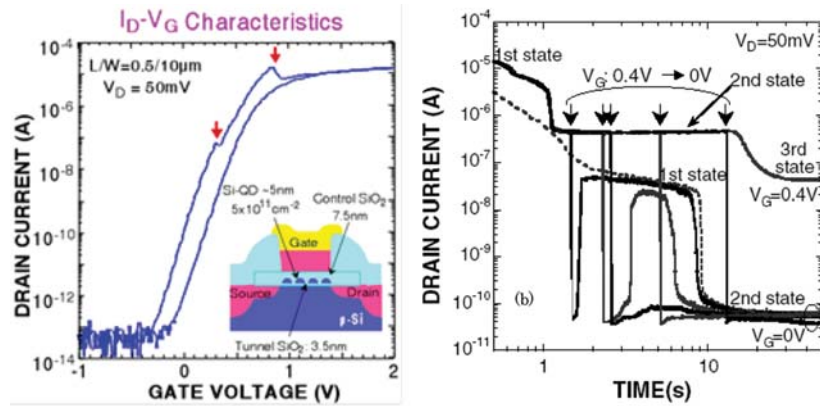
2.1.2. Memori MOSFET menggunakan titik kuantum Si

Seperti halnya memori divais konvensional yaitu satu sel memori MOSFET memuat pasangan transistor dan kapasitor begitu pula halnya dengan memori MOSFET titik kuantum. Transistor yang berfungsi sebagai *switching/saklar* dapat dibuat dengan menambahkan kanal baru berupa sumber (*source*) dan saluran (*drain*) sebagai pasangan untuk elektroda (*gate*). Sementara itu kapasitor yang berfungsi sebagai media penyimpanan muatan sudah terbentuk dengan sendirinya antara titik kuantum dan substrat. Aplikasi titik kuantum Si pada divais memori diperlihatkan Gambar 4.



Gambar 4. Skema MOSFET memori dengan titik kuantum Si sebagai gerbang mengambang (a), serta foto TEM dari penampang lintang divais memori titik kuantum [Tiwari. Dkk, 1996] (b).

Jika beda potensial diaplikasikan pada memori MOSFET maka akan diperoleh kurva I-V seperti pada Gambar 5 [Kohno, dkk., 2001]. Disini diperlihatkan operasi memori berupa *multiple-step charging* pada titik kuantum Si. Gejala *multiple-step charging* pada kuantum dot Si dapat dilihat lebih jelas pada gambar 5(b) dimana ditampilkan beberapa keadaan *charging* untuk waktu yang berbeda selama bias diberikan pada MOSFET memori. Dari grafik I-V ini terlihat bahwa kita bisa mengatur dan memilih tegangan *charging* pada divais memori dengan mengontrol properti dan karakteristik titik kuantum Si pada gerbang mengambang.



Gambar 5. I-V karakteristik MOSFET memori dengan kuantum dot Si sebagai *floating gate* (a) dan data eksperimen tentang *multiple-step charging* pada kuantum dot Si yang diperlihatkan oleh plot antara arus *drain* dan waktu (b).

2.2. Rekayasa Titik Kuantum Si dalam Perbaikan Kinerja Divais

Memori Berbasis Titik Kuantum

2.2.1. Rekayasa pita energi titik kuantum Si dengan inti Ge

Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1, ada beberapa syarat pokok yang belum dapat dipenuhi oleh divais memori yang menggunakan titik kuantum silikon, salah satu di antaranya adalah pendeknya waktu penyimpanan data (*retention time*). Secara ideal divais memori diharapkan dapat menyimpan data selama 10 tahun, namun dengan menggunakan titik kuantum hal ini masih sangat sulit untuk dicapai. Sejauh ini baru diperoleh waktu penyimpanan dalam orde beberapa minggu, hal ini disebabkan karena masih tingginya level energi yang dimiliki elektron setelah proses injeksi/*charging* oleh elektron. Hal ini akan terus terjadi

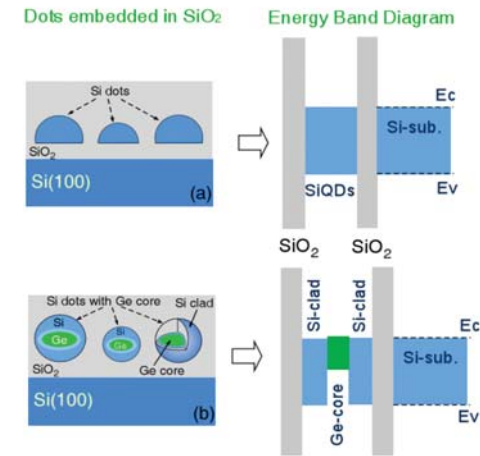
selama struktur pita energi titik kuantum Si tidak dimodifikasi.

Untuk mendapatkan divais memori gerbang mengambang yang tidak mudah bocor/menguap (*nonvolatile floating gate memory devices*) dengan ciri panjangnya waktu penyimpanan, oksida kontrol dan oksida terobosan yang relatif tebal mutlak diperlukan untuk mencegah hilangnya muatan antara gerbang mengambang dan oksida kontrol atau antara gerbang mengambang dan substrat. Oksida kontrol dan oksida terobosan yang tebal memerlukan tegangan yang lebih besar untuk menginjeksi muatan ke dalam gerbang mengambang, hal ini diperlukan untuk menurunkan kapasitansi ikatan pada gerbang mengambang. Ini berarti kebutuhan terhadap tegangan operasi yang rendah dan waktu pemrograman yang cepat pada *flash* memori merupakan hal yang bertentangan secara langsung dengan kondisi untuk memperpanjang waktu penyimpanan, hal ini disebabkan karena keduanya bergantung pada ketebalan oksida penerobosan. Dengan kata lain ada *trade off* antara konsumsi daya (*power*), kecepatan operasi, dan waktu penyimpanan muatan.

Kebanyakan penelitian dalam memori *flash* titik kuantum menggunakan titik kuantum Si untuk menggantikan lapisan lempeng gerbang mengambang (*floating gate*). Baru-baru ini, beberapa grup riset sudah menghitung dan melakukan simulasi penggunaan titik germanium (Ge), titik metal seperti TiN dan W untuk menggantikan titik Si [Min, *dkk.*, 1996; Shi, *dkk.*, 1999; Usuki, *dkk.*, 1999]. Kandidat pengganti ini menawarkan perbaikan untuk memperpanjang waktu penyimpanan

karier melalui celah pita energi yang lebih sempit. Dalam waktu bersamaan, celah pita yang kecil menyediakan batas pengurungan karier yang tinggi untuk moda penyimpanan dan sekaligus menyediakan potensial penghalang yang rendah untuk pemrograman pada moda penghapusan [Shi, *dkk.*, 1999; Usuki, *dkk.*, 1999]. Ge adalah kandidat kuat pengganti titik Si untuk gerbang mengambang, namun fabrikasi struktur nano Ge sangat sulit dilakukan dibanding Si karena temperatur evaporasi yang rendah dan perbedaan energi permukaan terhadap oksida. Penumbuhan struktur nano Ge hanya dilaporkan pada daerah temperatur tinggi dengan hanya menggunakan metode tertentu seperti implantasi ion Ge ke dalam SiO₂ [Min, *dkk.*, 1996], deposisi radio frequency dan/atau DC sputter di atas substrat Si dan oksidasi paduan SiGe yang diikuti thermal annealing pada temperatur tinggi untuk kristalisasi Ge. Di samping kesulitan dalam penumbuhan titik Ge di atas lapisan isolator, lapisan antarmuka Ge/oksida juga menunjukkan karakteristik yang buruk yang dapat menimbulkan cacat dan/atau perangkap untuk karier [Ahn, *dkk.*, 1999; Kim, *dkk.*, 2003].

Sebagai solusi alternatif untuk tetap mendapatkan keuntungan dari pita energi Ge yang sempit adalah dengan membentuk struktur titik kuantum Si dengan inti Ge sebagai media penyimpanan elektronik [Darma & Miyazaki, 2003; Darma, *dkk.*, 2003a; Darma, *dkk.*, 2003b; Darma, *dkk.*, 2003c]. Skema struktur titik kuantum Si tanpa dan dengan inti Ge ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Model titik kuantum Si tanpa dan dengan inti Ge disertai skematik diagram pita energi.

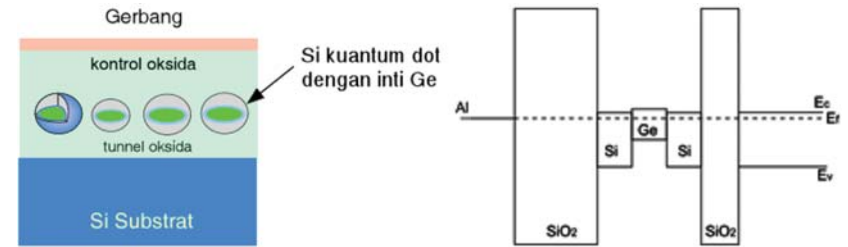
Struktur ini akan menjadi solusi yang paling menjanjikan untuk nano-divais memori sesuai dengan hasil perhitungan dan simulasi yang telah dilakukan [Darma, *dkk.*, 2008]. Ide pemanfaatan Ge sebagai inti titik Si adalah untuk meningkatkan daya tangkap atau pengurungan karier akibat celah pita energi Ge lebih sempit (0,66 eV) dibanding Si (1,2 eV), sumur potensial yang dalam akan terbentuk pada inti Ge yang akan menyebabkan karier terkumpul secara lebih stabil di Ge. Sebagai hasilnya, dengan memilih oksida terobosan (*tunnel oxide*) pada ketebalan tertentu, waktu penyimpanan dapat meningkat secara signifikan tanpa mengganggu kecepatan pemrograman (*writing/erasing*). Hasilnya, divais memory dengan kecepatan pemrograman yang tinggi serta waktu penyimpanan yang panjang dapat diwujudkan. Lebih jauh lagi, pasivasi

permukaan Ge dengan Si dapat menghindari kita dari karakteristik antarmuka Ge/oksida yang buruk.

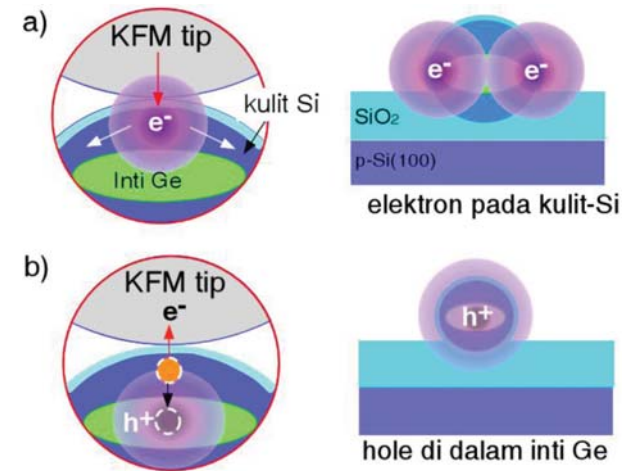
2.2.2 Disain dan pemodelan memori divais menggunakan titik kuantum Si dengan inti Ge

Sebelum memori MOSFET menggunakan titik kuantum Si dengan inti Ge direalisasikan, perlu dipelajari karakteristik struktur titik kuantum tersebut dalam proses *charging* dan *discharging*. Sebagai tahap awal telah ditinjau dan dikaji model struktur kapasitor *metal-oxide-semiconductor* (MOS) yang memuat titik kuantum Si dengan inti Ge sebagai media penyimpan seperti diperlihatkan pada Gambar 7. Dalam disain dan pemodelan ini telah dilakukan pemilihan ukuran dan posisi titik kuantum yang optimum disertai pemilihan ketebalan oksida terobosan (*tunnel oxide*) dan oksida gerbang (*gate oxide*) yang bervariasi.

Kajian eksperimen menggunakan analisis *Kelvin probe microscopy* (KFM) tentang proses penyimpanan karier pada struktur titik kuantum silikon dengan inti germanium menunjukkan hasil yang sangat menjanjikan untuk aplikasi divais memori, dimana diperoleh kecenderungan elektron untuk tersimpan secara stabil pada bagian silikon, sementara *hole* (lubang) cenderung tersimpan secara stabil pada bagian germanium seperti yang ditunjukkan oleh ilustrasi pada Gambar 8 [Darma, *dkk.*, 2003a]. Ini menunjukkan kecocokan dengan prediksi yang diharapkan dimana modifikasi pita energi titik kuantum dapat mengatur pola penyimpanan muatan dalam titik kuantum.



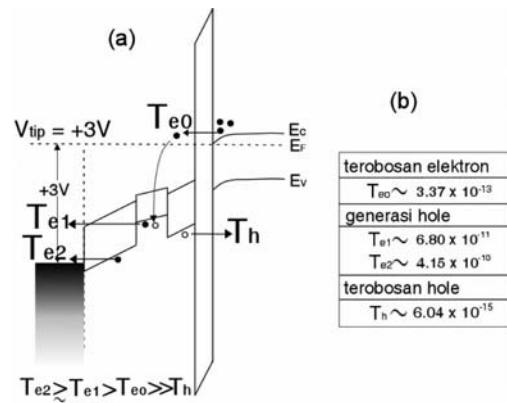
Gambar 7. Skematik model kapasitor *metal-oxide-semiconductor* (MOS) menggunakan titik kuantum Si dengan inti Ge dan ekivalen skematik energi band diagramnya



Gambar 8. Model injeksi (a) dan ekstraksi elektron (b) pada titik kuantum silikon dengan inti germanium menggunakan AFM Kelvin probe.

Mekanisme transpor dalam struktur titik kuantum ini juga sudah dipelajari dengan baik dimana diperoleh laju terobosan yang signifikan untuk injeksi elektron pada sisi silikon yang sangat bermanfaat dalam

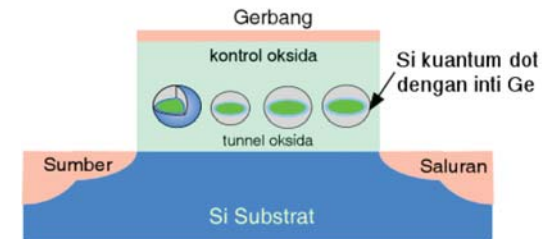
proses memori operasi (menulis dan menghapus) serta kontrol laju terobosan *hole* oleh rapat arus elektron dari substrat Si menuju kuantum dot [Darma, *dkk.*, 2003b]. Salah satu model mekanisme transpor yang melibatkan titik kuantum Si dengan inti Ge dalam kondisi bias maju ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Model mekanisme transpor titik kuantum silikon dengan inti germanium pada panjar maju (a) disertai hasil perhitungan probabilitas terobosan pada masing-masing area (b).

Setelah mendapatkan indikasi yang baik terhadap proses *charging* dan *discharging* menggunakan struktur kuantum dot ini selanjutnya dapat dilakukan simulasi memori operasi dan waktu penyimpanan karier dari struktur MOSFETs (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistors*) yang menggunakan titik Si dengan inti Ge sebagai gerbang mengambang. Hasil simulasi ini kemudian dibandingkan dengan memori yang menggunakan

titik kuantum silikon tanpa inti germanium. Model dasar dari MOSFET dengan titik Si dengan inti Ge sebagai gate mengambang diilustrasikan pada Gambar 10. Optimasi terhadap beberapa parameter juga sedang dan akan dilakukan seperti halnya panjang gerbang beserta jenis saluran/kanal yang akan digunakan sebagai sumber (*source*) dan *drain*.

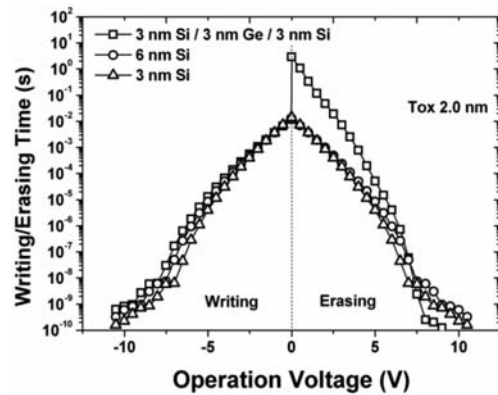


Gambar 10. Model dasar MOSFETs dengan titik Si dengan inti Ge sebagai gerbang mengambang.

Berdasarkan model di atas maka dilakukan perhitungan parameter-parameter penting dalam divais memori. Beberapa rumusan dasar yang digunakan melibatkan konsep waktu dalam divais memori yang dapat didefinisikan sebagai inversi dari rapat arus terobosan. Proses penulisan dan penghapusan rapat arus terobosan dihitung menggunakan metode yang diusulkan oleh Weinberg dan Register, dimana mereka mempertimbangkan kuantisasi karier dalam lapisan inversi atau akumulasi saat divais diberi bias. Rapat keadaan untuk pengurangan *hole* atau elektron pada sistem dua dimensi juga digunakan pada lapisan inversi atau akumulasi. Waktu penyimpanan juga diturunkan dengan memper-

timbangkan masing-masing keadaan tereksitasi dan keadaan dasar dari hetero-nanokristal [Darma, *dkk.*, 2008].

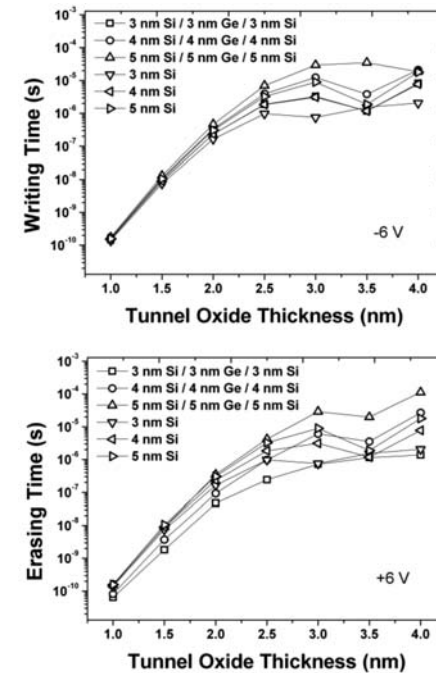
Setelah dilakukan perhitungan dan simulasi secara numerik maka diperoleh beberapa hubungan antara parameter divais memori serta karakteristik operasi memori. Untuk mengetahui kecepatan operasi divais memori sebagai fungsi dari tegangan operasi, maka dihitung waktu penulisan dan penghapusan jika diberi beda potensial dari -15 s/d +15 volt. Grafik antara waktu penulisan dan penghapusan terhadap tegangan operasi di tampilkan pada Gambar 11.



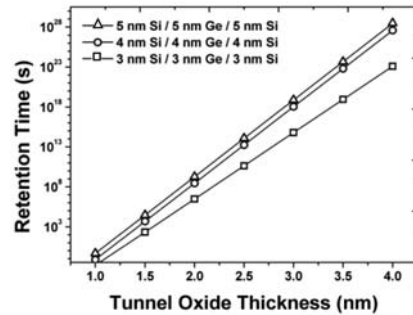
Gambar 11. Grafik antara waktu penulisan dan penghapusan sebagai fungsi dari tegangan operasi, simulasi dan perhitungan dilakukan untuk ketebalan oksida terobosan 2 nm.

Waktu menulis dan menghapus pada memori MOSFET sebagai fungsi dari ketebalan oksida terobosan di tampilkan pada Gambar 12.

Terlihat bahwa penambahan Ge pada inti kuantum dot tidak mempengaruhi kecepatan menulis dan menghapus divais memori ini. Terlihat bahwa kecepatan membaca dan menulis masih dalam orde mikrodetik untuk ketebalan oksida terobosan ~2 nm. Dapat disimpulkan bahwa modifikasi struktur pita energi titik kuantum tidak menimbulkan pengaruh negatif terhadap kinerja divais yang baru. Jadi keunggulan menggunakan titik kuantum silikon pada divais memori masih dapat dipertahankan, baik dari sisi kinerja maupun reliabilitasnya.



Gambar 12. Operasi memori MOSFET dengan titik kuantum Si dengan inti Ge sebagai fungsi ketebalan oksida terobosan.



Gambar 13. Grafik antara waktu penyimpanan sebagai fungsi dari ketebalan oksida terobosan.

Selanjutnya perlu tinjau peran penting penanaman inti Ge pada titik kuantum Si dalam upaya untuk meningkatkan waktu penyimpanan. Untuk itu dihitung hubungan antara ketebalan oksida terobosan dengan waktu penyimpanan yang ditampilkan pada Gambar 13.

Sebelumnya kita ketahui pada MOSFET memori dengan titik kuantum Si tanpa inti Ge waktu penyimpanannya dalam orde beberapa hari, maka dengan penanaman Ge pada titik kuantum Si diperoleh waktu penyimpanan dalam orde 10⁹ detik atau setara dengan 10 tahun. Hal ini diperoleh dengan memilih oksida terobosan sekitar 2 nm dan waktu penyimpanan akan terus meningkat jika ketebalan oksida terobosan ditingkatkan secara perlahan.

Dari hasil simulasi ini diperoleh harapan baru untuk memperbaiki memori MOSFET berbasis titik kuantum silikon yang mana dengan penggunaan titik kuantum silikon dengan inti germanium diperoleh

karakteristik divais yang sangat handal yaitu divais yang memiliki kecepatan operasi yang tinggi serta waktu penyimpanan yang sangat memadai.

Saat ini masih diupayakan fabrikasi memori divais berbasis titik kuantum silikon dengan inti germanium ini. Diharapkan dalam waktu dekat dapat dihasilkan prototipe memori MOSFET yang diharapkan.

2.3. Titik Kuantum (*quantum dots*) pada Kuantum Komputer

Titik kuantum juga memiliki fitur unik yang menjadikannya berpotensi untuk pemrosesan informasi kuantum. Telah diketahui secara luas bahwa *spin* elektron membentuk unit dasar informasi kuantum (*qubit*) yang hampir ideal: titik kuantum dapat digunakan untuk melokalisasi dan menangani *spin* tunggal secara elektronik atau optik. Titik kuantum yang tertanam dalam struktur nano fotonik juga dapat menjadi sumber deterministik ideal dari foton tunggal, hasil teoretis terbaru menunjukkan bahwa pulsa foton tunggal yang dihasilkan oleh individual titik kuantum, dalam kombinasi dengan fotodetektor dan elemen optik linier, sangat memungkinkan untuk komputasi kuantum yang efisien.

Para peneliti baru-baru ini telah menghasilkan susunan titik-titik kuantum 2D untuk komputer kuantum pada wafer CMOS 300 mm [Flaherty, 2020]. Salah satu fitur utama perangkat ini adalah kisi titik kuantum dua kali dua. Produksi massal himpunan berbasis kuantum dot ini adalah langkah kunci untuk meningkatkan stabilitas dalam

perancangan komputer kuantum. Dengan kata lain, memperluas prosesor komputer kuantum dengan himpunan titik kuantum 2D adalah kunci untuk implementasi rutin dalam stabilitas qubit dan koreksi kesalahan kuantum yang lebih efisien. Hal ini akan memungkinkan komputer kuantum masa depan memiliki toleransi kesalahan terhadap kegagalan qubit secara individu selama perhitungan.

Upaya ini terus dikembangkan untuk melengkapi fitur-fitur baru pada kuantum komputer sekaligus untuk mendapatkan konfigurasi optimal dalam meningkatkan stabilitas serta kinerja kuantum komputer dimasa yang akan datang.

3. PENGEMBANGAN LOGAM OKSIDA UNTUK APLIKASI DIVAIS MULTIFUNGSI.

Pada bagian kedua ini akan diuraikan sekilas tentang hasil penelitian terbaru dari *lab quantum semiconductor and device* (QS&D Lab) Fisika ITB yang berkaitan dengan material nano berbasis logam oksida untuk aplikasi divais multifungsi.

Dalam upaya menuju divais dan alat elektronik yang lengkap dari sisi fungsi, menyatu dan kompak dari sisi bentuk dan ukuran serta hemat dalam konsumsi energi, maka salah satu upaya yang tengah diupayakan para peneliti saat ini adalah melakukan eksplorasi terhadap sifat material maju secara komprehensif. Upaya ini bertujuan untuk mendapatkan sifat

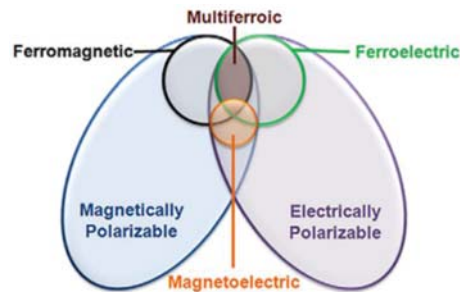
bahan dari berbagai probe dan tinjauan guna memaksimalkan fungsinya. Suatu material diharapkan dapat menampilkan sifat dengan sensitifitas yang memadai dari beberapa karakteristik dasar seperti halnya sifat mekanik, elektronik, optik dan magnetik. Eksplorasi yang intensif mengantarkan kita pada bidang baru yang multi aspek dan membuka peluang aplikasi secara multifungsi.

Dalam mewujudkan devais multifungsi ini, dalam bidang material maju tengah giat-giatnya dilakukan penelitian dalam bahan multiferroic. Multiferroic didefinisikan sebagai bahan yang menunjukkan lebih dari satu sifat feroik utama dalam fase yang sama, misalnya feromagnetisme - magnetisasi yang dapat dialihkan oleh medan magnet yang diberikan, atau ferroelectricity - polarisasi listrik yang dapat dialihkan oleh medan listrik yang diterapkan [Wang, 2010].

Dari beberapa kemungkinan kombinasi sifat feroik ini, salah satu prioritas kegiatan penelitian adalah memahami hubungan antara *ferroelectric* dan *ferromagnetic* dalam sistem *multiferroic*. Upaya untuk menghadirkan sifat Ferroelectric (FE) yang *electrically polarizable* dan Ferromagnetic (FM) yang *magnetically polarizable* secara simultan memunculkan tantangan tersendiri seperti yang juga dibahas oleh Eerenstein [Eerenstein, dkk, 2006], lihat gambar 14.

Tantangan utama untuk mendapatkan sifat magnetoelectric ini muncul akibat perbedaan kondisi yang diperlukan pada masing-masing sifat dasar materialnya, dimana sifat ferroelectric hampir selalu muncul

dalam material dengan struktur dengan kristalinitas tinggi dimana cacat strukturnya yang sangat rendah. Lebih jauh lagi system ferroelectric ini muncul pada sistem yang memiliki ion-ion dengan keadaan elektronik formal pada $3d^0$. Sementara sifat ferromagnetic mayoritas muncul pada material dengan tingkat kristalinitas rendah dengan tingkat cacat struktur yang tinggi serta memiliki konfigurasi elektron yang tidak penuh pada ruang orbital $2d$.



Gambar 14. Peluang Co-eksistensi dari FE dan FM pada karakteristik multiferroic (magnetoelectric).

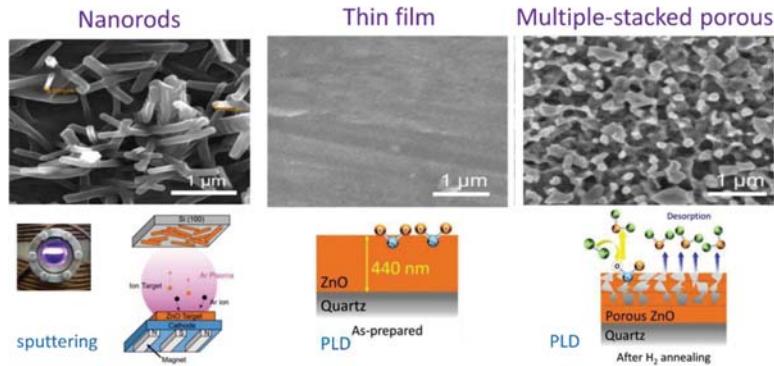
Mengatasi dilemma di atas, maka muncul beberapa alternatif solusi yang berupaya dalam menggabungkan sifat ferroelectric dan ferromagnetic melalui beberapa skenario yang diantaranya: (1) melalui struktur komposit [Wang, *dkk.*, 2010], (2) melalui pengaturan interface antara material [Sata *dkk.*, 2000], (3) rekayasa material melalui doping [Herng, *dkk.*, 2011] dan (4) dengan pengaturan struktur superlattice [Puggioni, *dkk.*, 2015].

Dari sekian banyak skenario yang diusulkan beberapa group penelitian di atas, kami di QS&D lab Prodi Fisika ITB juga melakukan upaya guna melakukan rekayasa sifat bahan dengan modifikasi struktur nano (Gambar 15) dan pemberian doping dengan unsur atom yang beragam. Di sini sistem utama yang dijadikan media penelitian adalah material logam oksida, lebih khusus lagi dipilih bahan yang sudah dikenal baik yaitu Seng Oksida (ZnO)[Darma, 2019].

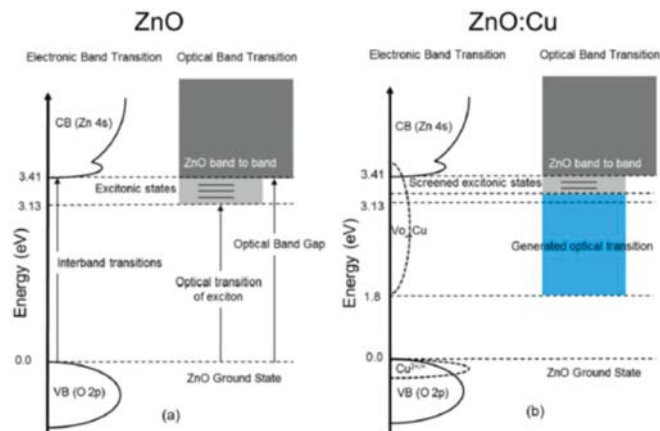
Meskipun material ZnO sudah dipelajari lebih dari 50 tahun belakangan ini, kemajuan ilmu dan teknologi membuka kembali peluang-peluang baru untuk mendapatkan fungsionalisasi lainnya melalui pemahaman sifat-sifat bahan yang baru diperoleh. Terbukanya fungsi baru dari sistem material ZnO membuatnya semakin diminati untuk diteliti kembali secara luas.

Kami juga sudah melaporkan temuan terkini terkait sifat optik bahan ZnO ini yang diikuti dengan potensi aplikasinya. Pemahaman baru mengenai perilaku *exciton* yang mendalam dapat membuka peluang untuk memperbaiki kinerja divais *photonic*, *photovoltaic* dan divais-divais *optoelectronic* lainnya. Sudah dilaporkan upaya yang efektif untuk *screening exciton* dengan rekayasa transisi optik melalui interaksi kekosongan oksigen dan keberadaan ion Cu di dalam sistem ZnO:Cu. *Screening exciton* memungkinkan kita untuk mengontrol lebih lanjut tingkat keadaan baru dari quasi-partikel elementer yang muncul dari pasangan *electron-hole* ini. Kami juga mendapatkan metode dalam pengaturan

konduktifitas optik pada bahan berbasis ZnO dengan dukungan data dan hasil eksperiment yang lengkap [Darma, dkk., 2014]. Hal ini ditampilkan dalam ilustrasi pada Gambar 16.

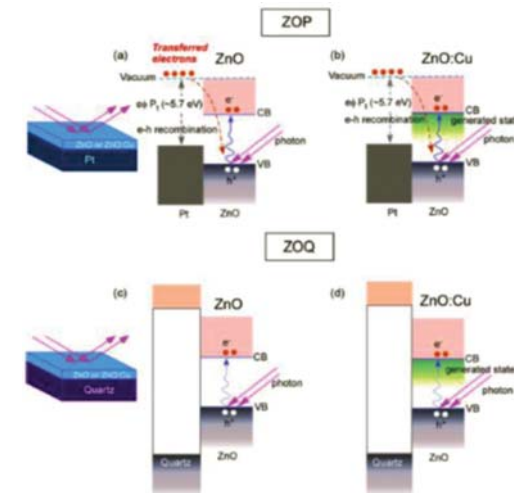


Gambar 15. Beberapa struktur nano dari ZnO untuk mempelajari sifat listrik, optik dan magnetik untuk aplikasi divais multifungsi disertai teknik preparasi yang sesuai.



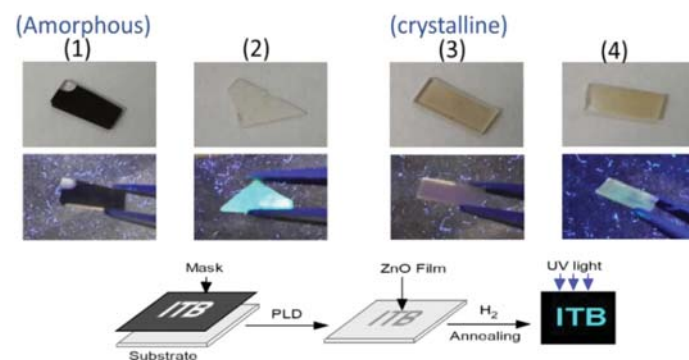
Gambar 16. Skema pita elektronik dan pita optik yang membandingkan keadaan *screening exciton* pada system film tipis ZnO murni dan ZnO : Cu .

Lebih jauh lagi, selain melakukan seleksi (screening) terhadap exciton (electron-hole pair), kami juga sudah melaporkan pengaruh lingkungan elektronik terhadap mobilitas dan dinamika exciton dalam bahan. Pemilihan lingkungan elektronik yang sesuai akan bisa meningkatkan, membatasi bahkan menghentikan (blocking) transfer exciton. Electronic blocking terhadap exciton merupakan salah satu upaya untuk dapat mengontrol kinerja piranti yang akan dirancang nantinya. Pada tahap ini, kami mencoba menentukan lingkungan elektronik melalui pemilihan substrate yang berbeda yaitu konduktor dan isolator [Darma, dkk., 2016]. Skematik diagram proses electronic blocking dari exciton ditampilkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Ilustrasi fenomena *Excitonic Blocking* pada lingkungan elektronik yang berbeda pada system film tipis ZnO.

Baru-baru ini kami juga sudah berhasil mempelajari kaitan antara sifat struktur bahan dengan konfigurasi stoikiometri lapisan tipis metal oksida yang dapat mempromosikan kekosongan unsur-unsur tertentu di dalam bahan. Kekosongan (*vacancy*) ini ternyata juga dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap sifat optik bahan. Pada Gambar 18 diperlihatkan salah satu hasil penelitian kami yang telah menghasilkan pancaran photon pada area 520nm (cahaya hijau) dengan intensitas yang sangat kuat. Pancaran photon ini dipicu oleh kekosongan oksigen pada lapisan tipis ZnO yang dipicu oleh struktur nano-pori yang tersusun secara bertingkat (*multiple-stacked nanophorous*) [Purbayanto, *dkk.*, 2018; Darma, *dkk.*, 2018].

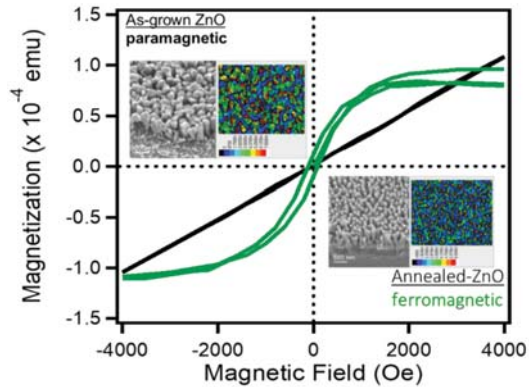


Gambar 18. Emisi kuat dari cahaya hijau (520nm) setelah modifikasi struktur nano-pori pada lapisan tipis ZnO

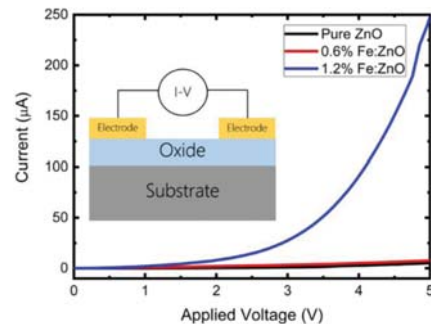
Rentang panjang gelombang pada pancaran cahaya yang dihasilkan dapat diatur melalui ukuran nano-pori pada permukaan bahan. Dengan kata lain, kita dapat memilih warna pancaran cahaya dengan mengatur

dimensi nano-porinya. Hal ini masih berkaitan erat dengan prinsip ukuran ruang terhadap fenomena pengurungan kuantum. Kajian ini dapat memberikan peluang baru dalam pengembangan divais *photonic* seperti halnya *light emitting devices* (LED).

Untuk melengkapi bahasan menuju divais multifungsi secara utuh, kami juga mencoba untuk memodifikasi bahan metal oksida ini menjadi bahan yang memiliki momen magnetik. Dalam keadaan normal, bahan metal oksida seperti ZnO biasanya bersifat diamagnetik atau paramagnetik. Melalui struktur berupa *nanorod* ZnO yang dilanjutkan dengan *annealing* secara thermal maka sifat magnetik film tipis ZnO dapat bergeser dari diamagnetic menjadi paramagnetic dan akhirnya bersifat ferromagnetic. Melalui Analisa yang lengkap maka dapat diketahui bahwa struktur *nanorod* yang diberi perlakuan *thermal annealing* bisa menginisiasi secara signifikan kekosongan atom O dan Zn pada area permukaan bahan. Dominasi kekosongan atom oksigen akan memunculkan sifat paramagnetik, dan kondisi yang didominasi kekosongan atom Zn akan menampilkan sifat ferromagnetik. Ini merupakan suatu awal baru untuk merancang divais masa depan berbasis ZnO dengan mengandalkan rapat arus elektron sekaligus spin elektron yang terrefleksi pada momen magnetiknya. Hasil penelitian ini sudah dipublikasikan baru-baru ini seperti yang ditampilkan pada Gambar 19 [Darma, *dkk.*, 2020].



Gambar 19. Modifikasi sifat magnetic film tipis ZnO melalui pengaturan cacat unsur dengan mengatur kekosongan Zn dan O



Gambar 20. Kurva I-V k dari ZnO murni dan ZnO yang didoping dengan atom Fe untuk konsentrasi yang berbeda.

Sementara itu, dalam beberapa tahun terakhir kami juga sudah mempelajari dengan sistematis sifat-sifat elektronik bahan metal oksida khususnya ZnO dan bahan sejenis lainnya. Dapat dipahami bahwa sifat elektronik dari ZnO ini dapat dikontrol dan dimodifikasi melalui banyak

cara, salah satunya melalui doping [Virdian, *dkk.*, 2020, Azizah, *dkk.*, 2020]. Teknik lain yang kami coba adalah dengan memodifikasi struktur nano dari permukaan film tipis yang digunakan. Sebagai contoh pada Gambar 20 ditampilkan I-V karakteristik dari ZnO murni dan ZnO yang didoping dengan Fe. Dimana kita bisa melihat peningkatan rapat arus dengan hadirnya atom Fe dalam struktur nano ZnO.

4. PROSPEK KEDEPAN

Uraian-uraian di atas memberikan harapan dan peluang baru bagi aplikasi material semikonduktor berstruktur nano khususnya stuktur titik kuantum berbasis silikon pada divais penyimpanan data. Melalui inisiasi yang kami lakukan, yaitu rekayasa energi bandgap pada titik kuantum berbasis Si dengan menanamkan atom Ge didalamnya, membuka peluang baru untuk menghasilkan sistem media penyimpanan data (divais memori) masa depan yang lebih baik, yaitu divais memori yang handal, berkapasitas tinggi dan hemat dalam konsumsi energi operasi. Sistem titik kuantum juga akan menjadi jalan yang menjanjikan untuk penyempurnaan kinerja kuantum komputer terutama sebagai media untuk mendapatkan qubit yang lebih stabil dan dapat dikontrol. Disamping itu, dengan mempertimbangkan titik kuantum sebagai atom buatan (*artificial atom*), maka sistem titik kuantum ini juga akan membuka jalan untuk menemukan sistem material baru yang belum pernah ada di alam.

Disamping itu upaya untuk mewujudkan divais multifungsi yang lebih baik dalam memenuhi tuntutan zaman juga terbuka lebar. Bahan yang sebelumnya dianggap sudah memasuki daerah saturasi dari sisi fungsi dapat kembali menjadi harapan baru untuk diolah melalui temuan-temuan karakteristik dan sifat-sifat barunya. Fungsi-fungsi baru yang terdapat dalam satu sistem bahan yang sama akan dapat melengkapi tuntutan aplikasi yang beragam, sekaligus dapat menyederhanakan kebutuhan teknologi proses yang diperlukan. Dalam hal material logam oksida, khususnya ZnO, dengan didapatkan dan dipahaminya sifat-sifat barunya secara komprehensif (sifat struktur, optik, elektronik dan sifat magnetiknya), maka akan terbuka peluang untuk mewujudkan divais dari satu bahan dasar yang sama dengan fungsi yang lengkap dan beragam. Pengaturan beberapa domain pada divais mendatang yang meliputi; ukuran dan struktur pada komponen aktifnya, domain waktu dan frekuensi serta faktor-faktor eksternal lainnya, akan menjadi parameter baru dalam aktivasi dan fungsionalisasi divais masa depan.

5. PENUTUP

Pengembangan struktur material nano dan material maju merupakan topik riset yang banyak dilakukan para peneliti di negara-negara maju guna memenuhi kebutuhan teknologi masa kini dan masa depan. Kami dari kelompok keahlian Fisika Material Elektronik Program Studi Fisika FMIPA ITB sudah ikut berkontribusi dalam area penelitian ini sejak

beberapa dekade terakhir. Peran serta lab *Quantum Semiconductor and Devices* Fisika MIPA ITB secara khusus adalah ikut mewarnai perkembangan penelitian dalam bidang nano material khususnya penelitian tentang titik kuantum (*quantum dot*) untuk aplikasi divais memori, kuantum informasi dalam konfigurasi komputer kuantum dan memberikan fondasi dalam sistem *artificial atom* untuk menemukan material baru. Kontribusi keilmuan yang diberikan adalah menghasilkan rekayasa pita energi didalam titik kuantum melalui preparasi titik kuantum dengan struktur hetero yaitu titik kuantum silikon dengan inti germanium. Struktur ini telah menunjukkan prospek yang sangat baik dimana waktu penyimpanan data yang sangat panjang dan didukung oleh reliabilitas divais dengan konsumsi energi yang sangat rendah. Wilayah paduan silikon dan germanium dalam sistem titik kuantum merupakan bagian terpenting dalam penelitian ini dimana dapat berperan sebagai media penyimpan unsur doping tepat di dalam titik kuantum. Dengan ini, titik kuantum dengan tipe-p atau -n akan dengan mudah diperoleh sebagai kegiatan antara untuk mendapatkan unsur penyusun material buatan yang baru. Lebih jauh lagi, area *intermixing* Si-Ge dalam titik kuantum juga akan menjadi media qubit yang lebih permanen dalam bidang aplikasi computer kuantum.

Sejalan dengan itu, kami dari *Quantum Semiconductor dan Devices Lab* Fisika MIPA ITB juga sudah memberikan sumbangan yang signifikan dalam mempelajari material logam oksida untuk mewujudkan suatu

divais yang multifungsi. ZnO yang tadinya dianggap sebagai bahan yang sudah mapan dari sisi potensi aplikasi dan fungsionalisi, kini kembali menjadi harapan baru untuk divais-divais masa depan yang lebih akurat, sensitive dan hemat dalam konsumsi energi.

Upaya pengembangan dan keberlanjutan penelitian ini masih terus diupayakan melalui penguatan internal serta kerjasama eksternal melalui kolaborasi luar negeri. Perlu terus diupayakan untuk mendorong penelitian dibidang nano material dan material maju ini untuk mengejar ketertinggalan kita dari negara-negara lain. Keterlibatan bersama para peneliti dalam negeri, mahasiswa serta interaksi konstruktif dengan kolabolator luar negeri diharapkan dapat memperkokoh penelitian dalam bidang ini.

Kekayaan sumber daya alam Indonesia yang sudah sering digaungkan harus selalu didukung dengan kesiapan sumber daya manusia yang menjadi pengelolanya. Prodi Fisika FMIPA ITB, khususnya *Quantum Semiconductor dan Devices Lab* terus berupaya untuk berperan aktif dalam menyiapkan SDM Indonesia dalam bidang ini dan senantiasa berupaya untuk melengkapi sarana dan alat pendukung penelitian yang saat ini masih dalam keadaan yang sangat terbatas. Dukungan semua pihak baik institusi ITB sebagai induk organisasi dan pemerintah secara lebih luas terus diharapkan untuk mempercepat kamajuan penelitian dalam bidang ini terutama dalam mengejar ketertinggalan kita dari peneliti dari negara-negara lain.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama saya memanjatkan puji syukur kehadirat Allah SWT, bahwasanya atas segala karuniaNya yang telah dilimpahkan hingga saat ini. Pada hari yang berbahagia ini, perkenankanlah saya menyampaikan ucapan terima kasih kepada yang terhormat Rektor dan Pimpinan ITB, Pimpinan dan seluruh Anggota Forum Guru Besar ITB, atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah di hadapan para hadirin sekalian pada forum yang terhormat ini. Terima kasih kami sampaikan juga kepada Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) serta jajaran pimpinan di FMIPA dan Program studi Fisika ITB. Terima kasih juga kami sampaikan kepada teman-teman semua, para guru dan dosen yang terhormat dan rekan-rekan kolega di Prodi Fisika yang sudah memberikan dukungan dan suasana kekeluargaan yang penuh semangat di ITB. Terima kasih juga kepada semua dosen dan sejawat di KK Fisika Material Eletronik atas semua doa dan dukungannya selama ini, tidak lupa juga ucapan terima kasih disertai harapan yang tinggi kepada semua anggota dan alumni lab *Quantum Semiconductor dan Devices* Fisika ITB atas dedikasi dan kerjakerasnya selama ini. Terima kasih juga saya sampaikan kepada semua guru, kolega dosen, kolaborator, kawan-kawan dan sahabat-sahabat yang tidak dapat dituliskan satu persatu atas semua dukungan, bantuan dan doanya. Selanjutnya ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada keluarga saya, istri tercinta Rena Widita dan anak-anak Ryuta dan

Rhean atas dukungan, pengorbanan dan kebersamaannya. Semoga ini jadi penyemangat bagi Ryuta dan Rhean untuk mencapai mimpi dan harapan yang jauh lebih tinggi lagi. Juga ucapan terima kasih yang dalam untuk saudara-saudara saya: Ni Yen, Benny, Dini dan An dan juga keluarga besar saya Mami Azinar, Ibu Samrah dan Etek Halimah, dan keluarga istri saya Boss Shinta, Mia, Pipok dan Yossi dan yang tidak kalah pentingnya adalah dukungan dan doa dari Bapak Mertua Kol Dr Yos Soesjoso (Alm) dan Mama dr. Iriana Karim. Akhirnya, terima kasih yang tak terhingga saya persembahkan kepada kedua orang tua saya Mama Darnailis (Alm) dan Papa Mawardi Hadi (Alm) atas doa, pengorbanan dan bimbingan yang sudah diberikan sampai akhir hayatnya, untuk mama dan papalah semua capaian ini saya persembahkan, semoga menjadi berkah dan amal baik yang selalu mengalir ke alam sana bagi Mama dan Papa, Amin.

DAFTAR PUSTAKA

- [Ahn, *dkk.*, 1999] C. G Ahn, H. S. Kang, Y. K. Kwong, S. M. Lee, B. R. Ryum, dan B. K Kang, "Oxidation-Induced Traps near SiO₂/SiGe Interface", *Journal of Applied Physics*, Vol. 86 (1999), hh. 1542-1547.
- [Azizah, *dkk.*, 2020] N. Azizah, S. Muhammadiyah, M. A. K. Purbayanto, E. Nurfani, T. Winata, E. Sustini, R. Widita, Y. Darma, "Influence of Al doping on the crystal structure, optical properties, and photodetecting performance of ZnO film". *Progress in Natural Science: Materials*

International Vol.30 No 1 (2020), hh.28-34.

- [Darma & Miyazaki, 2003] Y. Darma dan S. Miyazaki, *Digest of Papers of 2003 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2003)*, (Tokyo, Japan, 2003) IEEE Cat. No. 03EX738, h. 22.
- [Darma, *dkk.*, 2003a] Y. Darma, H. Murakami, dan S. Miyazaki, "Formation of Nanometer Silicon Dots with Germanium Core by Highly-Selective Low-Pressure Chemical Vapor Deposition", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 42 (2003), hh. 4129-4133.
- [Darma, *dkk.*, 2003b] Y. Darma, R. Takaoka, H. Murakami, dan S. Miyazaki, "Self-Assembling Formation of Silicon Quantum Dots with a Germanium Core by Low-Pressure Chemical Vapor Deposition", *Nanotechnology*, Vol. 14 (2003), hh. 413-415.
- [Darma, *dkk.*, 2003c] Y. Darma, K. Takeuchi, dan S. Miyazaki, *Extended Abstract of 2003 International Conference on Solid State Devices & Materials*, (Tokyo, Japan, 2003), h. 300.
- [Darma, *dkk.*, 2008], Y. Darma, T. Fatirahman, dan R. Kurniadi, "Simulation of Non-Volatile MOS Memory using Si Quantum Dot with Ge Core as Electronics Storage Node", *Solid State Science and Technology*, Vol. 16 (2008), hh. 160-167.
- [Darma, 2009] Y. Darma, *Membangun kemampuan riset nanomaterial di Indonesia, Divais memori berbasis titik kuantum silikon*, Book chapter IX, Rezeki putera bandung, (2009), h. 253.

- [Darma, *dkk.*, 2014] Y. Darma, T. S. Herng, R. Marlina, R. Fauziah, J. Ding and A. Rusydi, "Interplay of Oxygen vacancy and Cu in optical transitions and screening of excitons in ZnO:Cu films", *App. Phys.Lett*, 104, (2014). h. 081922.
- [Darma, *dkk.*, 2016] Y. Darma, R. Marlina, T. S. Herng, J Ding and A. Rusydi, "Strong Modification of Excitons and Optical Conductivity for different dielectric environments in ZnO films", *IEEE Photonics Journal*, V.8 no 3 (2016). pp. 1-9.
- [Darma., *dkk.*, 2018] Y. Darma, O. Chichvarina, M.A.K. Purbayanto, E. Nurfani, F.G. Setiawan, J. Ding, A. Rusydi, "Room temperature strong emission and excitonic enhancement in multiple-stacked nano-porous ZnO thin film". *Physica Status Solidi A* (2018) h.1800458,
- [Darma, *dkk.*, 2020] Y. Darma, S. Muhammadiyah, R. Widita, K. Takase, "Room-Temperature Ferromagnetism Induced by Zn Vacancy Enhancement Through ZnO Nanostructure Modification". *IEEE Magnetic Letters* (2020) 11(1), 1-4, Art no. 2501704,
- [Eerenstein, *dkk.*, 2006] W. Eerenstein, N. D. Mathur and J. F. Scott., "Multiferroic and magnetoelectric materials" *Nature*, (2006), 442, hh. 759–765.
- [Flaherty, 2020], N. Flaherty, *Ee news Europe*, Quantum dot boost for quantum computing, <https://www.eenewseurope.com/> December 29, 2020.

- [Fukuda, *dkk.*, 1997] M. Fukuda, K. Nakagawa, S. Miyazaki, dan M. Hirose, "Resonant Tunneling through a Self-Assembled Si Quantum Dot", *Applied Physics Letters*, Vol. 70 (1997), hh. 2291-2293.
- [Giles, *dkk.*, 2006] J. Giles, " Top five in physics" *Nature*, 17 May 2006 volume 441, h.265.
- [Hanafi , *dkk.*, 1996] H. I. Hanafi, S. Tiwari, dan I. Khan, "Fast and Long Retention-Time Nano- crystal Memory", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 43 (1996), hh. 1553-1558.
- [Herng, *dkk.*, 2011] T. S. Herng et al., "Mutual Ferromagnetic–Ferroelectric Coupling in Multiferroic Copper-Doped ZnO", *Adv. Mater.*, 23(14), (2011), hh.1635-1640.
- [Kim, *dkk.*, 2003] D. W. Kim, T. Kim, dan S. K. Benerjee, "Memory Characterization of SiGe Quantum Dot Flash Memories with HfO₂ and SiO₂ Tunneling Dielectrics", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 50 (2003), hh. 1823-1829.
- [King, *dkk.*, 2001] Y. C. King, T. J. King, dan C. M. Hu, "Charge-Trap Memory Device Fabricated by Oxidation of SixGe1-x", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 48 (2001), hh. 696-700.
- [Likharev, 1999] K. K. Likharev, "Single-Electron Devices and Their Applications", *Proceedings of IEEE*, Vol. 87 (1999), hh. 606-632.
- [Min, *dkk.*, 1996] K. S. Min, K. V. Shcheglov, C. M. Yang, H. A. Atwater, M. L. Brongersma, dan A. Polman, "The Role of Quantum-Confined

- Excitons vs Defects in the Visible Luminescence of SiO₂ Films Containing Ge Nanocrystals”, *Applied Physics Letters*, Vol. 68 (1996), hh. 2511-2513.
- [Morimoto, *dkk.*, 1996] K. Morimoto, Y. Hirai, K. Yuki, dan K. Morita, “Fabrication and Transport Properties of Silicon Quantum Wire Gate-All-Around Transistor”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 35 (1996), hh. 853-857.
- [Ohnesorge, *Dkk.*, 1996] B. Ohnesorge, M Albrecht, J Oshinowo, A Forchel, Y Arakawa, “Rapid carrier relaxation in self-assembled As/GaAs quantum dots”, *Physical Review B*, (1996) Vol 54, No.16, h. 11532.
- [Ohba, *dkk.*, 2002], R. Ohba, N. Sugiyama, K. Uchida, J. Koga, dan A. Toriumi, “Nonvolatile Si Quantum Memory with Self-Aligned Doubly-Stacked Dots”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 49 (2002), hh. 1392-1398.
- [Purbayanto., *dkk.*, 2018] M.A.K. Purbayanto, E. Nurfani, O. Chichvarina, J. Ding, A. Rusydi, Y. Darma, “Oxygen vacancy enhancement promoting strong green emission through surface modification in ZnO thin film”. *Applied Surface Science* (2018) 462, hh.466-470,
- [Punggioni, 2015] D. Punggioni, G. Giovannetti, M. Capone, J. M. Rondinelli “Design of a Mott multiferroic from a nonmagnetic polar metal” *Phys. Rev. Lett.* 115, (2015), h. 087202.
- [Sata, *dkk.*, 2000] N. Sata, K. Eberman, K. Eberl and J. Maier, “Mesoscopic

fast ion conduction in nanometre-scale planar heterostructures”, *Nature* volume 408, (2000), hh. 946–949.

- [Shi, *dkk.*, 1998] Y. Shi, K. Saito, H. Ishikuro, dan T. Hiramoto, “Effects of Traps on Charge Storage Characteristics in Metal-Oxide-Semiconductor Memory Structures Based on Silicon Nanocrystals”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 84 (1998), hh. 2358-2360.
- [Shi, *dkk.*, 1999], Y. Shi, K. Saito, H. Ishikuro, dan T. Hiramoto, “Effects of Interface Traps on Charge Retention Characteristics in Silicon Quantum-Dot-Based Metal-Oxide-Semiconductor Diodes”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 38 (1999), hh. 425-428.
- [Tiwari, *dkk.*, 1996] S. Tiwari, F. Rana, H. Hanafi, A. Hartstein, dan E. F. Crabbe, “A Silicon Nanocrystals Based Memory”, *Applied Physics Letters*, Vol. 68 (1996), hh. 1377-1379.
- [Usuki, *dkk.*, 1999] T. Usuki, T. Futatsugi, dan N. Yokoyama, “A Proposal of New Floating-Dot Memory Storing a Small Number of Electrons with Relatively Long Retention Time at Low Voltage Operations”, *Microelectronic Engineering*, Vol. 47 (1999), hh. 281-283.
- [Virdian, 2020], A. Virdian, S. Muhammadiyah, M. A. Naradipa, R. Widita, A. Rusydi, Y. Darma, “Enhancing photon absorption and conductivity of ZnO film by Fe doping: Experimental and first-principle perspectives”. *Ceramics International* (2020) Vol. 46, Issue 17, (2020), hh. 27110-27118,

- [Wang, 2010] Y. Wang, J. Hu, Y. Lin, C.W. Nan, "Multiferroic magnetoelectric composite nanostructures", *NPG Asia Mater.*, 2010, 2(2)hh. 61–68.
- [Yang, *dkk.*, 2001] H. G. Yang, Y. Shi, H. M. Bu, J. Wu, B. Zhao, X. L. Yuan, B. Shen, H. Han, R. Zhang, dan Y. D. Zheng, "Simulation of Electron Storage in Ge/Si Hetero-Nanocrystal Memory", *Solid State Electronics*, Vol. 45 (2001), hh. 767-771.
- [Yano, *dkk.*, 1999] K. Yano, T. Ishii, T. Sano, T. Mine, F. Murai, T. Hashimoto, T. Kobayashi, T. Kure, dan K. Seki, "Single-Electron Memory for Giga-to-Tera bit Storage", *Proceedings of IEEE*, Vol. 87 (1999), hh. 633-650.
- [Yuki, *dkk.*, 1995] K. Yuki, Y. Hirai, K. Morimoto, K. Inoue, M. Niwa, dan J. Yasui, " Si Double-Barrier Structures and Their Characteristics", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 34 (1995), hh. 860-863.
- [Zhao, *dkk.*, 2006] D. Zhao, Y. Zhu, R. Li, dan J. Liu, "Simulation of a Ge-Si Hetero-Nanocrystal Memory", *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 5 (2006), hh. 37-42

CURRICULUM VITAE



Nama : **YUDI DARMA**
 Tmpt./ Tgl Lahir : Payakumbuh, 13 Februari 1974
 Kel. Keahlian : Fisika Material Elektronik
 Alamat Kantor : Jl Ganesha 10 Bandung
 Nama Istri : Rena Widita, M.Si, Ph.D
 Nama Anak : 1. Ryuta Darma
 2. Rhean Darma

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- **Doctor of Engineering (Dr. Eng)**, Quantum Semiconductor Electronics Laboratory, Department of Quantum Matter, Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University, Hiroshima, Japan, 2004
- **Master of Science (MSc)**, Material Physics and Electronics Devices, Department of Physics, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 2000.
- **Sarjana Sains dalam bidang fisika (BSc)**, Department of Physics, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 1997

II. RIWAYAT KERJA di ITB

- Staf pengajar, Program Studi Fisika, FMIPA ITB, 1 Maret 1999 s.d. sekarang,

- Koordinator Mata kuliah Fisika Dasar TPB 2009-2013
- Kepala Divisi HKI, LPIK ITB 2012-2015

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/a, 1 Maret 1999
- PNS/Penata Muda, III/c, 1 Desember 2007
- Penata Tk.1, III/d, 1 April 2011
- Pembina, IV/a, 1 Oktober 2018
- Pembina Tk.1, IV/b, 1 Oktober 2020.

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli, 1 Maret 1999
- Lektor Kepala, 1 Desember 2007
- Profesor/Guru Besar, 1 April 2020.

V. KEGIATAN PENELITIAN

- (2020-2021) Pengaruh thermal annealing dan post-deposition treatment terhadap lapisan tipis bahan semikonduktor berbasis metal oksida untuk aplikasi divais multifungsi (Funding by Ristek/Dikti)
- (2019-2021) Studi dan pengembangan sifat ferromagnetik bahan metal oksida pada temperature ruang untuk aplikasi divais multifungsi (Funding by Ristek/Dikti)

- (2019) Studi Sifat Elektronik, Optik, dan Magnetik Sistem Oksipniktida Berlapis (LaO)ZnPn (Pn = P, As, Sb) (Funded by ITB)
- (2018-2019) simulasi arus tunneling pada divais elektronik dengan melibatkan pengaruh polarisasi spin electron (Funded by Ristek/Dikti)
- (2018), Principal Investigator, Pengaruh efek kuantum dalam material nano yang berbasis metal-oksida untuk pemanfaatan energy terbarukan melalui divais plasmonik dan photonic, (Funding by Riset KK ITB)
- (2015-2018) Principal Investigator, Pengembangan dan studi lapisan tipis metal oksida untuk divais nanofotonik dan spintronic, (Funding by PDUPT, kemenristekdikti, Indonesian Government)
- (2015-2018) Principal Investigator, 2D system (MoS₂, WS₂, Bi₂Te₃) for novel functional devices (Funding by Riset Kompetensi RistekDIKTI, Indonesian Government)
- (2014-2017) Principal Investigator, High-k Metal Oksida material untuk aplikasi devais elektronik (Funding by Riset sentralisasi DIKTI, Indonesian Government)
- (2014) Principal Investigator, Optical transition and Electrical band structure of ZnO by Spectroscopy Ellipsometry (Funding by DIPA batch II ITB)
- (2013) Principal Investigator, Carbon bases material using PVD

- technique (Funding by Riset sentralisasi DIKTI, Indonesian government)
- (2011-2012) Investigator, Development gas sensor, Funding By CRDF-USAID (PI: Dr. Fatma Lestari, UI)
 - (2011) Investigator, Development of multy stack fuel cell, Funding by Incentive research BPPT, Indonesian research and technology assessment bureau (PI; Dr. Eniya L. Dewi)
 - (2011) Investigator, Simulation of Fuel cell performance, Funding by BPPT, Indonesian research and technology assessment bureau (PI: Tjuktjuk S, BPPT)
 - (2011) Investigator, Research grant on image reconstruction and medical imaging, Funding by ITB (PI: R. Widita)
 - (2009) Investigator, Research grant on Medical Imaging, funding by ITB (PI: Rena Widita, Ph.D)
 - (2008) Principal Investigator, Research Grant on Simulation and modeling of Si-Based Light Emitting Devices using Quantum Dot structure, funding by ITB.
 - (2007 and 2008) Principal investigator, Competitive Research Grant 2007 (Hibah Besaing DP2M Dikti) on Improvement of MOSFETs memory devices performance by introduce Quantum Dot floating gate memory.
 - (2006) Principal Investigator, Research Grant on Quantum Dot Based Memory devices, B-Program, Dept of Physics, Faculty of

Mathematics and Natural Sciences, Institut Teknologi Bandung.

- (2006) Investigator, ITB Research Grant on Fabrication and Characterization of UV detector using M-S-M Al_xGa_{1-x}N on Silicon Substrate, Funding by ITB (PI: Dr. Euis Sustini)

VI. PUBLIKASI (SELECTED)

- R. Widita, S. Muhammadiyah, R. D. Prasetyawati, R. Marlina, L. Suryanegara, B. Purnama, R. Kurniadi, **Y. Darma**, "Revisiting the Structural, Electronic, and Magnetic Properties of 2 (LaO)MnAs: Effect of Hubbard Correction and Origin of Mott3 Insulating Behavior", *ACS OMEGA* (2021), 6,6,4440–4447, (IF 2.87, Q1). [Open access]
- M. A. K. Purbayanto, E. Nurfani, M. A. Naradipa, R. Widita, A. Rusydi, **Y. Darma**, Enhancement in green luminescence of ZnO lateral nanorods structure, *Optical Materials* (2020) 108, October 2020, 110418, (IF 2.779, Q1).
- A Virdian, S Muhammadiyah, M A Naradipa, R Widita, A Rusydi, **Y Darma**, Enhancing photon absorption and conductivity of ZnO film by Fe doping: Experimental and first-principle perspectives. *Ceramics International* (2020) Volume 46, Issue 17, 1 December 2020, Pages 27110-27118, (IF 3.830, Q1).
- S Muhammadiyah, R Widita, **Y Darma**, Influence of Ch substitution on structural, electronic, and thermoelectric properties of layered oxychalcogenides (La_{0.5}Bi_{0.5}O)CuCh (Ch = S, Se, Te): a new insight from first principles. *RSC Advances* (2020) 10(46), 27481-27491, (IF 3.119,

- Q1). [Open access]
- S Muhammadiyah, F A Noor, R Widita, **Y Darma**, *Ferromagnetism and structural deformation in monolayer alpha lead oxide induced by N and F doping: New insights from first principles. **International Journal of Quantum Chemistry (2020)** 120(16), e26268, (IF 1.747, Q2).*
 - **Y. Darma**, S Muhammadiyah, R Widita, K Takase, *Room-Temperature Ferromagnetism Induced by Zn Vacancy Enhancement Through ZnO Nanostructure Modification. **IEEE Magnetic Letters (2020)** 11(1), 1-4, Art no. 2501704 (IF 1.672, Q2).*
 - S Muhammadiyah, S Suryana, F A Noor, **Y Darma**, *The first principle calculation of elemental-vacancy-assisted modifications on structural properties and optical responses of ZnO system. **Progress in Natural Science: Materials International (2020)** 30(1), 118-123, (IF 3.310, Q1).* [Open access]
 - N Azizah, S Muhammadiyah, M A K Purbayanto, E Nurfani, T Winata, E Sustini, R Widita, **Y Darma**, *Influence of Al doping on the crystal structure, optical properties, and photodetecting performance of ZnO film. **Progress in Natural Science: Materials International (2020)** 30(1), 28-34, (IF 3.310, Q1).* [Open access]
 - M A K Purbayanto, A Rusydi, **Y Darma**, *The effect of crystallinity on the surface modification and optical properties of ZnO thin films. **Physical Chemistry Chemical Physics (2020)** 22, 2010-2018, (IF 3.567 Q1).*

- S Muhammadiyah, A S Erlyanti, R Widita, **Y Darma**, *Investigation of structural and electronic properties by pnictogen substitution in the layered oxy pnictides (LaO)ZnPn (Pn = P, As, Sb), **International Journal of Quantum Chemistry (2020)** 120, e26090, (IF 2.263, Q1).*
- R D Wulandari, S Muhammadiyah, **Y Darma**, *Tuning spin state of Ru⁴⁺ ion and Jahn-Teller distortion in cubic SrRuO₃ system by controlling in-plane strain: A first-principle study. **Journal of Physics and Chemistry of Solids (2020)** 137, 109225, (IF 2.752, Q2).*
- E Nurfani, G T M Kadja, M A K Purbayanto, **Y Darma**, *The role of substrate temperature on defects, electronic transitions, and dark current behavior of ZnO films fabricated by spray technique. **Materials Chemistry and Physics (2020)** 239, 122065, (IF 2.781, Q2).*
- **Y Darma**, E Nurfani, M A K Purbayanto, R Widita, A Rusydi, K Takase, *Post-annealing effects on excitonic states and defects in nanostructured Ti-doped ZnO thin films. **Materials Research Express (2019)** 6, 076434, (IF 1.449, Q2).*
- M A K Purbayanto, E Nurfani, R Widita, K Takase, **Y Darma**, *Tuning optoelectronic properties through in-plane arrangement and point defects in ZnO nanorods as prepared by room-temperature dc-unbalanced magnetron sputtering. **Physica Status Solidi A (2019)** 216, (IF 1.795, Q2).*
- Y Kurniawan, S Muhammadiyah, R Widita, **Y Darma**, *Optical properties and plasmonic states in two-dimensional alpha lead oxide*

systems: a density-functional study. *Materials Research Express* (2019) 6, 055908, (IF 1.449, Q2).

- **Y Darma**, S Muhammadiyah, YN Hendri, E Sustini, R Widita, K Takase, Tuning the point-defect evolution, optical transitions, and absorption edge of zinc oxide film by thermal exposure during molecular beam epitaxy growth. *Materials Science in Semiconductor Processing* (2019) 93, 50-58, (IF 2.593, Q1).
- E Nurfani, MAK Purbayanto, R Akutsu, MA Naradipa, LJ Diguna, MD Birowosuto, K Takase, A Rusydi, **Y Darma**, Tuning the excitonic properties of ZnO:Sn thin films. *Optical Materials* (2019) 88, 111-116, (IF 2.320, Q1).
- S Muhammadiyah, Y Kurniawan, A Rusydi, **Y Darma**, Electronic and magnetic properties of new half-metallic ferromagnetic rutile $Ti_{1-x}V_xNi_yO_2$ ($x = y = 6.25\%$): A first-principles study. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* (2019) 125, 16-22, (IF 2.207, Q2).
- **Y Darma**, O Chichvarina, MAK Purbayanto, E Nurfani, FG Setiawan, J Ding, A Rusydi, Room temperature strong emission and excitonic enhancement in multiple-stacked nano-porous ZnO thin film. *Physica Status Solidi A* (2018) 1800458, (IF 1,751 Q1)
- MAK Purbayanto, E Nurfani, O Chichvarina, J Ding, A Rusydi, **Y Darma**, Oxygen vacancy enhancement promoting strong green emission through surface modification in ZnO thin film. *Applied Surface Science* (2018) 462, 466-470, (IF 4,439, Q1)

- S Muhammadiyah, Y Kurniawan, S Ishiwata, A Rousuli, T Nagasaki, S Nakamura, H Sato, A Higashiya, A Yamasaki, A Rusydi, K Takase and **Y Darma**, "Electronic and thermoelectric properties of layered oxychalcogenides (BiO)CuCh (Ch = S, Se, Te)", *Inorganic Chemistry* 2018, 57, 10214-10223, (IF 4.7, Q1).
- S Muhammadiyah, Y, Suryana, **Y Darma**, "Local-symmetry distortion, optical properties, and plasmonic states of monoclinic Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ system: a density-functional study" *Materials Research Express*, 2018, 5096303, (IF 1.151, Q1),
- E Nurfani, M.A.K. Purbayanto, T Aono, K Takase, **Y Darma**, Origin of fast-response photocurrent in ZnO thin film, *Optical Materials* 84 (2018) 453–458, (IF 2.320, Q1).
- L J Diguna, L Tjahjana, **Y Darma**, S Zeng, H Wang, M D Birowosuto, "Light–Matter Interaction of Single Quantum Emitters with Dielectric Nanostructures", *Photonics* 2018, 5(2), 14; (IF: 2,14, Q1)
- S Muhammadiyah, Y Kurniawan, M A K Purbayanto, **Y Darma**, "The effect of vacancies on the optical properties and plasmonic states of zinc oxide: A first-principal study", 2018, *Materials Research Express*, (IF 1.151, Q1).
- S N Pratama, Y Kurniawan, S Muhammadiyah, K Takase, **Y Darma**, "Structural and magnetic properties of nickel nanowires grown in porous anodic aluminium oxide template by electrochemical deposition

- technique" 2018, *Materials Research Express*, Vol 5, Number 3, (IF 1.151, Q1).
- E Nurfani, C D Satrya, I Abdurrahman, I M Sutjahja, T Winata, K Takase, A Rusydi, **Y Darma**, *Weakening of excitonic screening effects in $TixZn1-xO$ thin films*, *Thin Solid Films*, Volume 645, 1 January 2018, Pages 399-404, (IF: 1.867, Q1)
 - S Muhammadiyah, I M. Sutjahja, A Rusydi, T Winata, K Takase, and **Y Darma**, *Unrevealed electronic and optical properties of the layered oxychalcogenides (LaO)CuCh (Ch = S, Se, Te): A density-functional study*, *Japanese Journal of Applied Physics* 56 (12), 121201 (2017), (IF: 1.384, Q2).
 - R Kurniawan, I M Sutjahja, T Winata, T S Herng, J Ding, A Rusydi, **Y Darma**, *Polarization behavior of zinc oxide thin films studied by temperature dependent spectroscopic ellipsometry*, *Optical Materials Express* 7 (11), 3902-3908(2017), (IF: 2.561, Q1).
 - E Nurfani, R Kurniawan, T Aono, K Takeda, Y Shirai, I Magdalena S, A Rusydi, T Winata, K Takase, **Y Darma**, *"Defect-induced excitonic recombination in $TixZn1-xO$ thin films grown by DC-unbalanced magnetron sputtering"*, *Japanese Journal of Applied Physics* 56 (11), 112101, 2017 (IF: 1.384, Q2)
 - L J Diguna, **Y Darma**, M D Birowosuto, *"The Coupling of Single-Photon Exciton-Biexciton Quantum Dot and Cavity"*, *J. Nonlinear Optic. Phys. Mat.* Vol. 26 (2017) No. 03, 17500291-15, (IF:1.00, Q3).

- U Saleem, F A Permatasari, F Iskandar, T Ogi, K Okuyama, **Y Darma**, M Zhao, K P Loh, A Rusydi, P Coquet, M D Birowosuto, H Wang, *"Surface Plasmon Enhanced Nitrogen-Doped Graphene Quantum Dot Emission by Single Bismuth Telluride Nanoplates"*, *Advanced Optical Materials*, 2017, 1700176. (IF: 6.875, Q1)
- S Muhammadiyah, E Nurfani, R Kurniawan, I M Sutjahja, T Winata, **Y Darma**, *The effect of Ta dopant on electronic and optical properties of anatase TiO_2 : a first-principles study*, *Mater. Res. Express* 4 024002, 2017. (IF 1.151, Q1).
- E Nurfani, N Zuhairah, R Kurniawan, S Muhammadiyah, I M Sutjahja, T Winata and **Y Darma**, *Influence of Ti Doping on Electrical Properties of ZnO-based Photodetector*, *Mater. Res. Express* 4 024001, 2017. (IF 1.151, Q1).
- R Kurniawan, F Willy, E Nurfani, S Muhammadiyah, I M Sutjahja, T Winata and **Y Darma**, *Illumination effects on ferroelectric properties of zinc oxide films grown by dc-unbalanced magnetron sputtering*, *Mater. Res. Express* 4, 2017. (IF 1.151, Q1).
- **Y Darma**, C D Satrya, R Marlina, R Kurniawan, T S Herng, J Ding, and A Rusydi, *Plasmon-exciton interaction and screening of exciton in ZnO-based thin film on bulk Pt as analyzed by spectroscopic ellipsometry*, *Japanese Journal of Applied Physics* 56, 01AD06, 2017, (IF: 1.384, Q2)
- K Makihara, T Kato, Y Kabeya, Y Mitsuyuki, A Ohta, D Oshima, S

- Iwata, **Y Darma**, M Ikeda, S Miyazaki, "Nano spin-diodes using FePt-NDs with huge on/off current ratio at room temperature", *Sci Rep.* **2016**; 6: 33409, 2016 Sep 12. (IF: 4.259, Q1)
- **Y Darma**, R Marlina, T S Herng, J Ding and A Rusydi, *Strong Modification of Excitons and Optical Conductivity for different dielectric environments in ZnO films*, *IEEE Photonics Journal*, V.8 no 3 pp. 1-9, June 2016 (IF: 2.291, Q1)
 - M Zhao, M Bosman, D Mohammad, Z Minggang, J Zhang, P Song, N Gao, **Y Darma**, A Rusydi, Qing-Hua Xu, Hsin Lin, Qiaoliang Bao, Cheng-Wei Qiu, and Kian Ping Loh, "Visible Surface Plasmon Modes in Single Bi₂Te₃ Nanoplate", *Nano lett.* Vol. 15, Issue 12, 9 Dec 2015, Pages 8331-8335. (IF: 12.712, Q1)
 - R Marlina, A Rusydi and **Y Darma**, *Optical Properties and Interband Transitions of ZnO and Cu-doped ZnO Films Revealed by Spectroscopic Ellipsometry Measurement*, *Advanced Material Research*, Vol. 1112 (2015) pp 124-127.
 - H Alfiadi, A Virdian and **Y Darma**, *Electrical Properties of Carbon-Based Thin Film on Al₂O₃/Si*, *Advanced Material Research*, Vol. 1112 (2015) pp 85-88.
 - A Virdian, H Alfiadi and **Y Darma**, *Study of Carbon Thin Film Deposition on Various Buffer Layer as Characterized by X-Ray Diffraction and Raman Spectroscopy*, *Advanced Material Research*, Vol. 1112 (2015) pp 106-109.

- **Y Darma** and A Rusydi, *Optical Band Transitions and Excitonic States in ZnO:Cu Films*, *Advanced Material Research*, Vol. 1112 (2015) pp 3-6.
- **Y. Darma**, F. G. Setiawan, M. A. Majidi and A. Rusydi, *Theoretical Investigation on Electronic Properties of ZnO Crystals Using DFT-Based Calculation Method*, *Advanced Material Research*, Vol. 1112 (2015) pp 41-44.
- **Y Darma**, T S Herng, R Marlina, R Fauziah, Jun Ding and A Rusydi, *Interplay of Oxygen vacancy and Cu in optical transitions and screening of excitons in ZnO:Cu films*, *App. Phys.Lett*, 104, 081922 (2014), (IF: 3.411, Q1).
- P Dinari, C Chandra, J Suwardy, S Mustofa and **Y Darma**, "SrTiO₃ Thin Films Deposition Using Pulsed Laser Deposition Technique", *Journal of Advance Material Research*, Vol. 789, 2013 pp. 72-75.
- **Y Darma**, H Murakami and S Miyazaki "Influence of Thermal Annealing on Compositional Mixing and Crystallinity of Highly-Selective Grown Si Dots with Ge Core" *Appl. Surf. Sci.* 224 (2004) No. 1-4 pp.156-159, (IF: 3.387, Q1)
- **Y Darma**, H Murakami and S Miyazaki "Formation of Nanometer Si Dots with Ge core by Highly-selective Low-Pressure Chemical Vapor Deposition" *Jpn. J. Appl. Phys.* 42 (2003) No. 6B pp.4129-4133, (IF: 1.384, Q2)
- **Y Darma**, R Takaoka, H Murakami and S Miyazaki "Self-

Assembling Formation of SiQDs with Ge core by Low-Pressure Chemical Vapor Deposition” **Nanotechnology** **14** No. 4 (2003) pp.413-415, (IF: 3.440, Q1)

- Y Darma, T Fatirahman, R Kurniadi “Simulation of Non-Volatile MOS Memory using Si Quantum Dot with Ge Core as electronics Storage Node”, **Journal of Solid State Science and Technology**, Vol. 16, No1 (2008) pp 160-167
- **Y Darma**, “Photoemmission Studies of Si Quantum Dot with Ge Core: Dots Formation, Intermixing at Si-clad/Ge-core interface and Quantum Confinement effect”, **ITB J. Sci.** Vol. 40 A, No. 1, 2008, 87-96, DOI: (Q3)
- **Y Darma**, T Fatirahman, R Kurniadi “Simulation of Non-Volatile MOS Memory using Si Quantum Dot with Ge Core as electronics Storage Node”, **Journal of Solid State Science and Technology letter**, Vol 14, No.2, Nov 2007. P.43.

VII. PENGHARGAAN

- **Anugrah HKI produktif dan berkualitas 2020**, Kemenristek/BRIN RI, kategori Penulis utama produktif bidang sains dan teknologi, Jakarta.
- **2nd Best Paper Award** “ICEIC2013 Grand Hyatt Bali 30 Jan-2 Feb 2013” by IEEK and IEEE CE
- **Indonesian Achievement Award**, Excelcomindo Indonesia

(November 15th, 2007, Jakarta), Category: Science and Technology

- **Indonesian Science Institute Award**, LIPI (November 29th, 2006, Jakarta).
Category: Best young researcher in Engineering and Technology
- **Solid State Devices and Material 2003 Award** (September 15th, 2004, Tokyo)
Category: Young Researcher Award for excellent papers by young researcher.
- **President Hiroshima University Distinction Award** (March 23rd, 2004, Hiroshima) for outstanding academic and research achievement.
- **Microprocesses and Nanotechnology 2002 Award** (October 29th, 2003, Tokyo).

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen Profesional, pada 10 Agustus 2009, Departemen Pendidikan Nasional Republik Indonesia.