

## STUDI FOTODIODE FILM TIPIS SEMIKONDUKTOR $Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$ DIDADAH TANTALUM

Irzaman

Departemen Fisika FMIPA - IPB  
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

### ABSTRAK

#### STUDI FOTODIODE FILM TIPIS SEMIKONDUKTOR $Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$ DIDADAH TANTALUM.

Telah dilakukan penumbuhan film tipis  $Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$  (BST) murni dan yang didadah tantalum pentoksida 5% (BSTT) di atas substrat silikon (100) tipe-p dan di atas substrat *Transparent Conductive Oxyde* (TCO) tipe-7056 menggunakan metode *Chemical Solution Deposition* (CSD) dan *spin coating* pada kecepatan putar 3000 rpm selama 30 detik. Film tipis di atas substrat silikon dipanaskan pada suhu 850 °C, 900 °C dan 950 °C, sedangkan film tipis di atas substrat TCO tipe-7059 dipanaskan pada suhu 400 °C, 450 °C dan 500 °C. Dari hasil karakterisasi ketebalan menunjukkan ketebalan meningkat dengan naiknya suhu pemanasan dari 400 °C sampai 500 °C sedangkan pada suhu pemanasan 850 °C sampai 950 °C ketebalan turun. *Energy gap* film tipis naik dengan naiknya suhu pemanasan dari 400 °C sampai 500 °C, tetapi dengan penambahan *doping* dapat menurunkan *energy gap* film tipis. Nilai konduktivitas listrik film tipis BST dan BSTT berada pada rentang material semikonduktor. Konduktivitas listrik film tipis secara umum turun dengan naiknya suhu pemanasan. *Doping* tantalum yang diberikan, secara umum dapat menaikkan konduktivitas listrik film tipis. Nilai konduktivitas ini berubah terhadap perubahan intensitas cahaya yang jatuh pada film tipis. Dengan demikian film tipis ini bersifat fotokonduktiv. Konstanta dielektrik film tipis turun jika suhu pemanasan dinaikkan, namun *doping* tantalum dapat menaikkan konstanta dielektrik film tipis. Dari hasil karakterisasi arus-tegangan didapatkan film tipis BSTT bersifat fotodiode.

**Kata kunci** : Fotodiode, Semikonduktor, BSTT, Energi *bandgap*, Konstanta dielektrik

### ABSTRACT

#### PHOTODIODE STUDY OF Ta-DOPED $Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$ THIN FILM SEMICONDUCTOR.

Growth of pure  $Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$  (BST) thin film and 5% Tantalum Pentoxide (BSTT) doped thin film on tipe-p (100) silicon substrate and on 7056 type-TCO substrate using chemical solution deposition (CSD) methode and spin coating at 3000 rpm rotation speed for 30 seconds have been done. Thin film on silicon substrates were heated at 850 °C, 900 °C and 950 °C while thin film on TCO substrate were heated at 400 °C, 450 °C and 500 °C. Thickness characterizations showed increasing thickness with increasing of temperature from 400 °C to 500 °C but decreasing for heating temperature of 850 °C to 950 °C. Energy gap of thin film were also in creasing with increasing heating temperature from 400 °C to 500 °C, but doping addition could increase this energy. Conductivity value of BST and BSTT thin films were within semiconductor materials value range. In general the conductivity decreased with heating temperature. Tantalum doping also increased conductivity value. This conductivity value changed with the intensity lighth and gave the photo conductive properties to this materials. Dielectric constant of thin film decreased with increasing heating temperature while Ta-doping will decrease it. Current-voltage characterization gave BSTT thin film photodiode properties.

**Key words** : Photodiode, Semiconductor, BSTT, Energy bandgap, Dielectric constant

### PENDAHULUAN

Material feroelektrik memiliki kemampuan untuk mengubah arah listrik internalnya, dapat terpolarisasi secara spontan dan menunjukkan efek histerisis yang berkaitan dengan pergeseran dielektrik dalam menanggapi medan listrik internal [1-2]. Penelitian material feroelektrik saat ini di arahkan pada pengembangan *device* generasi baru sehubungan

dengan sifat-sifat yang dimilikinya. Sifat histeresis dan konstanta dielektrik yang tinggi dapat diterapkan pada sel memori *Dynamic Random Access Memory* (DRAM) dengan kapasitas penyimpanan melampaui 1 Gbit, sifat piezo-elektrik dapat digunakan sebagai mikroaktuator dan sensor, sifat piroelektrik dapat diterapkan pada sensor infra merah dan sifat elektro

optik untuk diterapkan pada *switch* termal infra merah, sifat *polaryzability* dapat diterapkan sebagai *Non Volatile Ferroelectric Random Access Memory (NVFRAM)* [1-2].

Dalam makalah ini disampaikan hasil penelitian tentang pembuatan film tipis  $Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$  (BST) dan film tipis  $Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$  yang didadah Tantalum Pentoksida ( $Ta_2O_5$ ) 5% (BSTT) dengan metode *Chemical Solution Deposition (CSD)* yang dipanaskan pada suhu 850 °C, 900 °C dan 950 °C, di atas substrat silikon (400) type-*p*. Sedangkan pada suhu pemanasan 400 °C, 450 °C dan 500°C di atas substrat *Trasparant Conductive Oxide (TCO)* type-7059. Film tipis yang didapatkan dikarakterisasi ketebalan, *energy bandgap*, konduktivitas listrik, konstanta dielektrik dan arus fotodiodenya.

## TEORI

Film tipis Barium Stronsium Titanat (BST) memiliki konstanta dielektrik tinggi, kebocoran arus rendah dan tahan terhadap tegangan *breakdown* yang tinggi pada suhu Curie. Suhu Curie pada barium titanat adalah 130 °C. Dengan adanya *doping* stronsium suhu Curie menurun menjadi suhu kamar. Film tipis BST telah difabrikasi dengan beberapa teknik seperti *sputtering*, *laser ablation*, dan *sol gel process* [3].

Penambahan sedikit pendadah dapat menjadikan perubahan parameter kisi, konstanta dielektrik, sifat elektro-kimia, sifat elektro-optik dan sifat piroelektrik dari keramik pada film tipis. Penambahan tantalum akan memberikan bahan piroelektrik yang bersifat menyerupai semikonduktor tipe-*n* (donor *doping*) [4].

Fotodiode adalah semikonduktor sensor cahaya yang menghasilkan arus atau tegangan ketika sambungan semikonduktor *p-n* dikenai cahaya. Piranti fotokonduktivitas dibuat dengan tujuan menghasilkan perubahan resistansi atau tegangan ketika disinari cahaya. Dengan demikian *devices* banyak digunakan sebagai *ON-OFF devices*, *measuring devices*, atau *limited power sources* [5]. Kapasitansi adalah kemampuan penyimpanan muatan untuk suatu perbedaan potensial tertentu. Ketika suatu dielektrik diletakkan antara keping-keping kapasitor, medan listrik dari kapasitor mempolarisasikan molekul-molekul dielektrik. Pengukuran sifat optik merupakan hal yang sangat penting dalam penentuan *energy bandgap* material semikonduktor [6-7].

## METODE PERCOBAAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah bubuk Barium Asetat [ $Ba(CH_3COO)_2$ , 99%], Stronsium Asetat [ $Sr(CH_3COO)_2$ , 99%], Titanium Isopropoksida [ $Ti(C_{12}O_4H_{28})_2$ , 99.999%], Tantalum Pentoksida [ $(Ta_2O_5)$ ], pelarut 2-metoksietanol [ $H_3COCH_2CH_2OH$ , 99%], substrat Si (100) tipe-*p* dan substrat *Trasparant Conductive Oxide (TCO)* tipe-7059.

Metode penumbuhan film tipis pada penelitian ini menggunakan metode *Chemical Solution Deposition (CSD)* dengan pelapisan satu kali. Film tipis yang ditumbuhkan kemudian dipanaskan pada suhu 400 °C, 450 °C dan 500 °C untuk film tipis yang ditumbuhkan pada substrat TCO. Film yang telah dipanaskan dilakukan karakterisasi ketebalan dengan menggunakan metode *volumetrik* dan persen transmitansi untuk kemudian dihitung *energy bandgap*nya. Sedangkan film tipis yang ditumbuhkan pada substrat silikon dipanaskan pada suhu 850 °C, 900 °C dan 950 °C. Setelah dipanaskan film ini dikarakterisasi ketebalannya dengan metode *volumetrik*, karakterisasi konduktivitas listrik dengan terlebih dahulu mengukur konduktansi listrik menggunakan LCR-meter. Pengukuran konduktansi film tipis ini dilakukan pada kondisi gelap dan kondisi terang dengan daya  $1,17 \times 10^{-3}$  watt dan  $1,05 \times 10^{-2}$  watt.

Perhitungan Karakterisasi konstanta dielektrik film tipis dilakukan dengan terlebih dahulu mengukur nilai kapasitansi dari grafik waktu pengisian dan pengosongan muatan pada layar osiloskop dengan menggunakan metode rangkaian RC, di mana resistor yang digunakan bernilai 10 kOhm dan frekuensi tegangan kotak yang diberikan sebesar 10 kHz. Selanjutnya dilakukan karakterisasi arus tegangan fotodiode menggunakan alat I-V meter.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Perhitungan Ketebalan Film Tipis

Perhitungan ketebalan ini menggunakan nilai kerapatan dari  $BaTiO_3$  yaitu  $6,02 \text{ g/cm}^3$  [8]. Diambil nilai kerapatan  $BaTiO_3$  karena belum ditemukannya literatur nilai kerapatan  $Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$ . Dari hasil perhitungan (Tabel 1) didapatkan ketebalan film tipis yang ditumbuhkan di atas substrat silikon tipe-*p* semakin menurun jika suhu pemanasan dinaikkan dari 850 °C sampai dengan 950 °C.

**Tabel 1.** Ketebalan film tipis BSTT di atas substrat silikon tipe-*p* terhadap suhu pemanasan menggunakan metode volumetrik.

Suhu Pemanasan	Ketebalan ( $\mu\text{m}$ )	
	Silikon 0%	Silikon 5%
850 °C	1,247	1,116
900 °C	0,821	0,800
950 °C	0,486	0,492

Menurunnya ketebalan film tipis karena pada suhu tinggi film tipis yang telah terdeposisi pada permukaan substrat mengalami titik uap yang menyebabkan lapisan yang terdeposisi menjadi berkurang [4]. Sebaliknya, ketebalan film tipis pada substrat TCO tipe-7059 (Tabel 2) semakin meningkat jika suhu pemanasan dinaikkan dari suhu 400 °C sampai

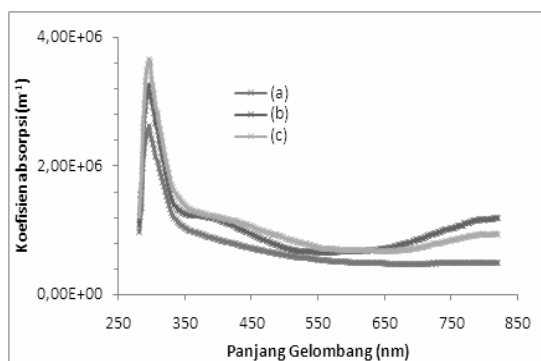
**Tabel 2.** Ketebalan film tipis BSTT di atas substrat TCO tipe-7059 terhadap suhu pemanasan menggunakan metode volumetrik.

Suhu Pemanasan	Ketebalan ( $\mu\text{m}$ )	
	TCO 0%	TCO 5%
400 °C	0,670	0,659
450 °C	1,074	0,810
500 °C	1,201	0,909

dengan 500 °C. Meningkatnya ketebalan film tipis karena pada suhu rendah film tipis yang telah terdeposisi pada permukaan substrat mengalami pembentukan lapisan tipis yang menyebabkan lapisan yang terdeposisi menjadi bertambah [4].

### Hasil Perhitungan Energy Bandgap

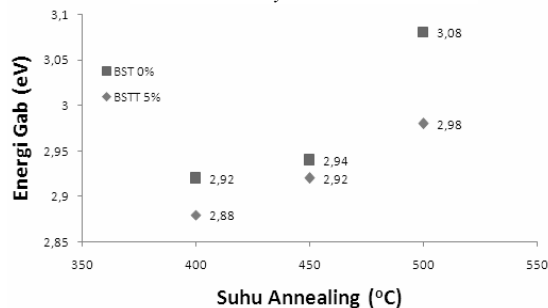
Dari hasil pengukuran didapatkan data persen transmisi. Untuk perhitungan *energy gap* menggunakan *plot Tauc* dari grafik hubungan  $\sqrt{ah\nu}$  sebagai fungsi panjang gelombang. Digunakan metode ini karena koefisien absorpsi yang didapatkan ( $\alpha \geq 10^3 \text{ cm}^{-1}$ ) [3], untuk masing-masing film tipis, seperti yang terdapat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Kurva koefisien absorpsi (a) sebagai fungsi panjang gelombang pada film tipis BSTT (doping 5%). (a) Film tipis BSTT dipanaskan pada suhu 500 °C, (b) Film tipis BSTT dipanaskan pada suhu 450 °C, (c) Film tipis BSTT dipanaskan pada suhu 400 °C.

Dari grafik hubungan  $\sqrt{ah\nu}$  sebagai fungsi dilakukan *plot Tauc* dan didapatkan nilai energi *bandgap* film tipis yang dipanaskan pada suhu 400 °C, 450 °C dan 500 °C masing-masing-masing 2,92 eV, 2,94 eV dan 3,08 eV untuk film tipis tanpa *doping*. Akibat adanya *doping* tantalum menurunkan energi *bandgap* masing-masing film tipis yang dipanaskan pada suhu pada 400 °C, 450 °C, dan 500 °C menjadi 2,88 eV, 2,92 eV, dan 2,98 eV. Apabila atom donor ditambahkan pada suatu semikonduktor, tingkat energi yang diperkenankan akan berada sedikit di bawah pita konduksi [9]. Hadirnya pita baru ini yang menyebabkan energi *bandgap* film tipis turun dengan *didoping* tantalum yang bervalensi lima.

Grafik Hubungan Suhu Annealing Vs Energy Band Gap



**Gambar 2.** Energi *gap* terhadap variasi suhu pemanasan film tipis BST (tanpa *doping*) dan BSTT (*doping* 5%).

Dari Gambar 2 terlihat energi *bandgap* semakin meningkat dengan kenaikan suhu pemanasan dari 400 °C sampai 500 °C. Hasil ini sama seperti yang didapatkan oleh penelitian sebelumnya untuk film tipis BaTiO<sub>3</sub>. Energi *gap* naik jika suhu pemanasan dinaikkan dari 300 °C sampai 400 °C, karena terjadi peningkatan energi kinetik [10]. Dari Gambar 2 terlihat pula bahwasanya *doping* tantalum yang diberikan pada film tipis BST menurunkan energi *gap* film tipis, karena elektron-elektron yang dihasilkan pada pita konduksi menurun.

### Hasil Perhitungan Konduktivitas Listrik Film Tipis

Pengaruh suhu pemanasan *doping* tantalum dan intensitas cahaya terhadap konduktivitas film tipis dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4. Dari tabel tersebut diketahui konduktivitas maksimum terjadi pada suhu 850 °C untuk film tipis BST dan pada suhu 900 °C untuk film tipis BSTT. Secara umum suhu pemanasan menurunkan konduktivitas listrik film tipis BST dan BSTT. Penurunan ini disebabkan terjadinya peningkatan evaporasi lapisan film tipis sehingga ketebalan lapisan film tipis berkurang. Penipisan lapisan film tipis ini menyebabkan jarak difusi bagi elektron pada semikonduktor tipe-*p* berkurang, dengan demikian perpindahan elektron dari pita valensi menuju pita konduksi lebih mudah [11].

**Tabel 3.** Nilai konduktivitas listrik film tipis tanpa *didoping*

Suhu	Doping 0%		
	Konduktivitas listrik (S/cm <sup>-1</sup> )		
	0 watt	1,17x10 <sup>-3</sup> watt	1,05x10 <sup>-2</sup> watt
850 °C	4,45x10 <sup>-5</sup>	4,75 x10 <sup>-5</sup>	4,84 x10 <sup>-5</sup>
900 °C	9,85x10 <sup>-6</sup>	4,04 x10 <sup>-7</sup>	2,91 x10 <sup>-7</sup>
950 °C	1,83x10 <sup>-7</sup>	1,92 x10 <sup>-7</sup>	3,35 x10 <sup>-7</sup>

Peningkatan intensitas yang jatuh pada film tipis meningkatkan arus pada film tipis, akhirnya menaikkan

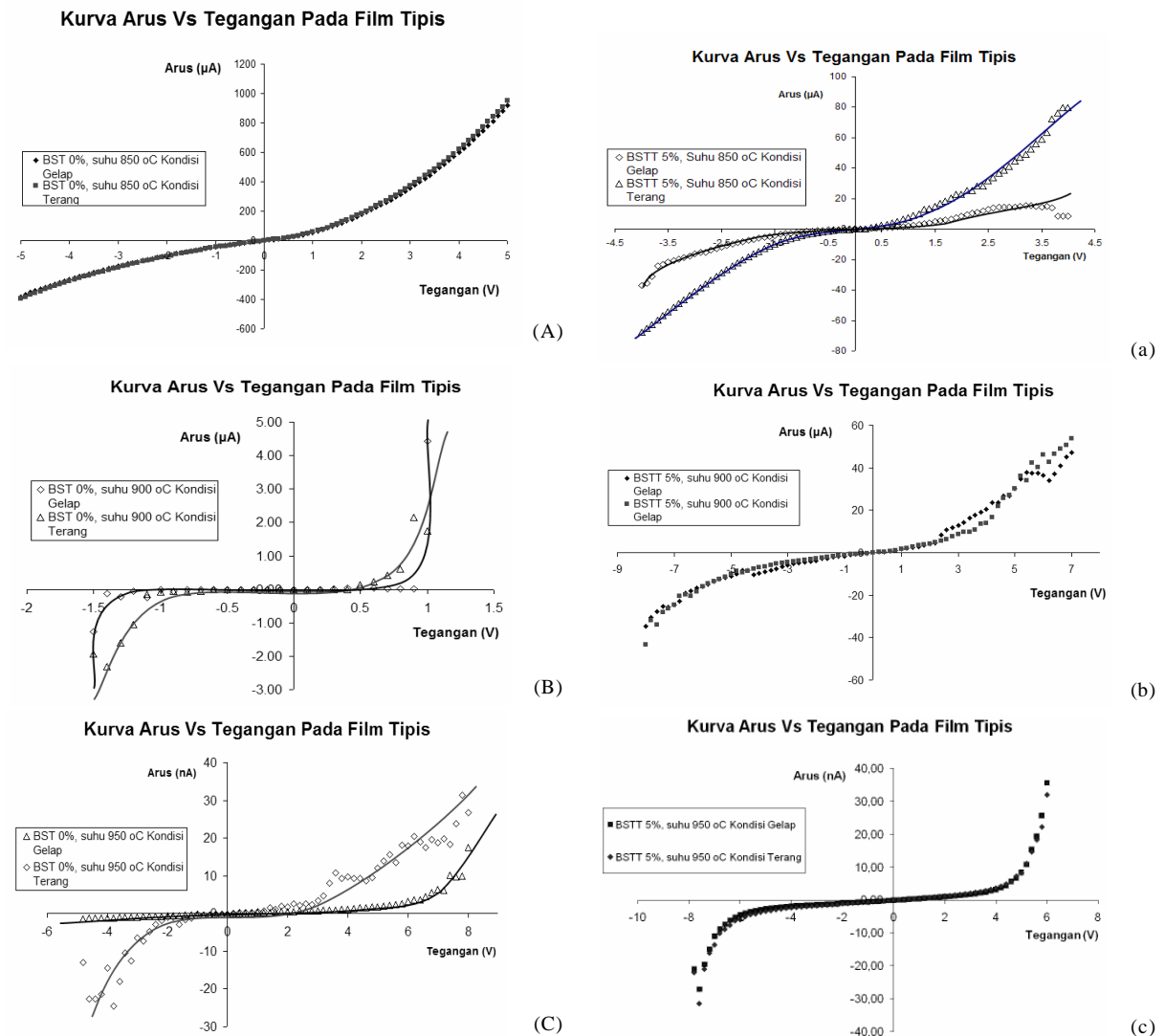
Tabel 4. Nilai Konduktivitas listrik film tipis didoping 5%

Suhu	Doping 5%		
	Konduktivitas listrik ( $S/cm^{-1}$ )		
	0 watt	$1,17 \times 10^{-3}$ watt	$1,05 \times 10^{-2}$ watt
850 °C	$6,95 \times 10^{-6}$	$7,34 \times 10^{-6}$	$7,59 \times 10^{-6}$
900 °C	$3,76 \times 10^{-5}$	$3,85 \times 10^{-5}$	$5,55 \times 10^{-5}$
950 °C	$2,83 \times 10^{-6}$	$2,42 \times 10^{-6}$	$1,68 \times 10^{-6}$

konduktivitas listrik film tipis. Tetapi pada film tipis *BST* yang dipanaskan 900 °C, konduktivitas listriknya turun jika intensitas cahaya dinaikkan. Sedangkan pada film tipis *BSTT* konduktivitas listriknya turun jika intensitas cahaya dinaikkan pada suhu pemanasan 950 °C.

Turunnya konduktivitas listrik film tipis jika intensitas dinaikkan terjadi karena proses jatuhnya elektron (dari film tipis *BSTT*) ke *hole* (pada substrat silikon tipe-*p*) mengakibatkan rekombinasi sehingga menurunkan nilai arus. Menurunnya nilai arus menyebabkan konduktivitas listrik film tipis *BSTT* menurun ketika diberi cahaya [12].

Secara umum penambahan *doping* tantalum meningkatkan konduktivitas listrik film tipis. Peningkatan konduktivitas listrik akibat penambahan *doping* tantalum karena *doping* atom pentavalen menghasilkan banyak elektron pada pita konduksi karena tiap atom pentavalen menyokong satu elektron pita konduksi. Tetapi pada suhu pemanasan 850 °C penambahan *doping* tantalum menurunkan konduktivitas listrik film tipis [6].



Gambar 3. Kurva arus Vs tegangan fotodiode pada film tipis.

- (A) Film tipis BST (tanpa *doping*) dipanaskan pada suhu 400 °C,
- (B) Film tipis BST (tanpa *doping*) dipanaskan pada suhu 400 °C,
- (C) Film tipis BST (tanpa *doping*) dipanaskan pada suhu 400 °C,
- (a) Film tipis BSTT (*doping* 5%) dipanaskan pada suhu 400 °C,
- (b) Film tipis BSTT (*doping* 5%) dipanaskan pada suhu 400 °C,
- (c) Film tipis BSTT (*doping* 5%) dipanaskan pada suhu 400 °C.

Tampak dalam Tabel 3 dan Tabel 4 bahwa orde nilai konduktivitas listrik film tipis *BST* dan *BSTT* termasuk material semikonduktor.

### Hasil Perhitungan Konstanta Dielektrik Film Tipis

Tabel 5 menunjukkan bahwa konstanta dielektrik semakin kecil dengan bertambahnya suhu pemanasan dan bertambah besar dengan adanya penambahan *doping* tantalum. Menurunnya konstanta dielektrik ini akibat ketebalan film tipis semakin kecil dengan kenaikan suhu pemanasan. Sedangkan dengan adanya penambahan *doping* tantalum menaikkan kapasitansi [2].

**Tabel 5.** Nilai kapasitansi dan konstanta dielektrik pada film tipis *BST* (tanpa *doping*) dan *BSTT* (*doping* 5 %Ta) untuk masing-masing suhu pemanasan.

Suhu pemanasan	Tanpa <i>doping</i>		<i>Doping</i> 5%	
	C (nF)	Dielektrik ( $\epsilon$ )	C (nF)	Dielektrik ( $\epsilon$ )
850 °C	0,50	17,62	1,11	34,98
900 °C	0,68	15,76	0,9	20,33
950 °C	0,498	6,84	0,63	8,76

*Doping* tantalum menambah konsentrasi pembawa muatan negatif menyebabkan medan listrik dalam daerah deplesi bertambah, akibatnya molekul dielektrik bertambah besar. Meningkatnya medan listrik ini menurunkan medan listrik eksternal yang dikenakan padanya. Pada film *BST* nilai kapasitansi terbesar terdapat pada suhu 900 °C, tetapi konstanta dielektriknya lebih besar dari pada suhu 850 °C. Hal ini disebabkan ketebalan pada suhu 850 °C lebih besar dari pada suhu 900 °C dan konstanta dielektrik bertambah dengan naiknya ketebalan bahan dielektrik.

### Hasil Pengukuran Arus Tegangan Fotodiode Film Tipis

Dari hasil karakterisasi arus tegangan fotodiode pada film tipis didapatkan film tipis *BST* dan *BSTT* yang ditumbuhkan pada substrat Si tipe-*p* memiliki sifat diode. Dari hasil ini pula didapatkan film tipis *BST* dan *BSTT* sensitif terhadap cahaya. Hal ini ditunjukkan dengan adanya pergeseran kurva arus tegangan pada saat kondisi gelap dan pada saat kondisi terang, meskipun pergeseran ini kecil. Pergeseran yang kecil ini menunjukkan bahwasanya arus foto yang dihasilkan kecil. Dengan adanya pergeseran kurva arus-tegangan film tipis *BST* dan *BSTT* saat diberi cahaya maka film tipis ini merupakan piranti fotodiode.

### KESIMPULAN

Nilai energi *bandgap* film tipis dipanaskan pada suhu 400 °C, 450 °C, dan 500 °C masing-masing 2,92 eV,

2,94 eV dan 3,08 eV untuk film tipis tanpa *doping*. Akibat adanya *doping* tantalum menurunkan *energy bandgap* masing-masing film tipis yang dipanaskan pada suhu pada 400 °C, 450 °C, dan 500 °C menjadi 2,88 eV, 2,92 eV, dan 2,98 eV. Ini diduga karena atom donor yang ditambahkan pada suatu semikonduktor, menyebabkan tingkat energi yang diperkenankan akan berada sedikit di bawah pita konduksi. Hadirnya pita baru ini yang menyebabkan energi *bandgap* film tipis menurun dengan didadad tantalum yang bervalensi lima. Dari kurva arus tegangan film tipis DST dan BSTT, film tipis yang ditumbuhkan bersifat fotodiode.

### DAFTAR ACUAN

- [1]. AZIZAHWATI, *Jurnal Nasional Indonesia*, **5** (1) (2002) 50-56
- [2]. IRZAMAN, Y.DARVINA, A FUAD, P.ARIFIN, M.BUDIMAN and M BARMAWI, Physical and Pyroelectric properties of Tantalum-oxide doped lead Zirconium titanate  $[Pb_{0,9950}(Zr_{0,525}Ti_{0,465}Ta_{0,010})O_3]$  Thin film and Their Application for IR Sensor, *Phys., Stat., Sol. (A)*, **199** (3) (2003) 416-424
- [3]. N. V. GIRIDHARAN, R. JAYAVEL, P. RAMASAMY, *Structural, Morphological and Electrical Studies on Barium Strontium Titanate Thin Films Prepared by Sol-Gel Technique*. Crystal Growth Centre, Anna University, Chennai, India, **36** (2001) 65-72
- [4]. A. C. W. UTAMI, Studi Efek Fotovoltaik Film Tipis  $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$  yang Didadad Tantalum (BSTT) di Atas Substrat Si (100) Tipe-p, *Skripsi*, Departemen Fisika - IPB, Bogor (2007)
- [5]. S. M. SZE, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons Inc, United States of America, (1981)
- [6]. S. R. RIO, MASAMORI IIDA, *Fisika dan Teknologi Semikonduktor*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta (1999)
- [7]. IRZAMAN, Studi Lapisan Tipis Pyroelektrik  $PbZr_{0,52}Ti_{0,48}O_3$  (PZT) yang Didadad Tantalum dan Penerapannya sebagai Detektor Infra Merah, *Disertasi*, ITB, Bandung (2005)
- [8]. Anonim, [http://en.wikipedia.org/wiki/Barium\\_Titanate](http://en.wikipedia.org/wiki/Barium_Titanate). (8 Maret 2008), P. MALVINO, *Electronic Principles 2<sup>nd</sup> Edition*, McGraw-Hill Inc., (1979)
- [9]. R. SETIABUDY, *Material Teknik Listrik*. Universitas Indonesia (UI-Press), Jakarta, (2007)
- [10]. H. FRIMASTO, IRZAMAN, M KURNIATI, Sifat Optik Film Tipis Bahan Ferroelektrik  $BaTiO_3$  yang didadad tantalum (BTT), *Skripsi*, Departemen Fisika - IPB, Bogor, (2006)
- [11]. MARWAN, Studi Efek Fotovoltaik Bahan  $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$  yang Didadad Galium (BGST) di Atas Substrat Si (100) Tipe-n, *Skripsi*, Departemen Fisika-IPB, Bogor, (2007)