



**FABRIKASI P-N DIODE MELALUI DOPING TIPE-P DENGAN BORON PADA  
SILICON WAFER TIPE-N BERBASIS MASKLESS PHOTOLITHOGRAPHY**

**LAPORAN PROYEK AKHIR  
UJIAN AKHIR SEMESTER  
MATA KULIAH DESAIN ELEKTRONIKA LANJUT**

**IZZUDIN AL AYYUBI  
2006574780**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO**

**DEPOK  
DESEMBER 2024**

## DAFTAR ISI

<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>ii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>iii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. <b>Latar Belakang .....</b>	<b>1</b>
1.2. <b>Rumusan Masalah .....</b>	<b>1</b>
1.3. <b>Tujuan Penelitian .....</b>	<b>2</b>
1.4. <b>Batasan Penelitian .....</b>	<b>2</b>
<b>BAB 2 STUDI LITERATUR .....</b>	<b>3</b>
2.1. <b>Dioda .....</b>	<b>3</b>
2.2. <b>Maskless Photolithography .....</b>	<b>3</b>
2.3. <b>Silicon Wafer .....</b>	<b>4</b>
2.4. <b>Doping.....</b>	<b>5</b>
2.5. <b>Boron .....</b>	<b>5</b>
2.6. <b>Hot Point Probe .....</b>	<b>5</b>
2.7. <b>I-V Characteristics Curve.....</b>	<b>6</b>
<b>BAB 3 DESAIN EKSPERIMEN .....</b>	<b>7</b>
3.1. <b>Alur Kerja Eksperimen .....</b>	<b>7</b>
3.2. <b>Proses Pembukaan <i>Diffusion Window Wafer Silicon on Insulator (SOI)</i> ...</b>	<b>8</b>
3.2.1. <b>Tipe Silicon Wafer yang Digunakan .....</b>	<b>9</b>
3.2.2. <b>Parameter Laser untuk Pembukaan <i>Diffusion Window SOI</i> .....</b>	<b>10</b>
3.3. <b>Proses Doping Silicon Wafer .....</b>	<b>10</b>
3.3.1. <b>Pembuatan Dopan .....</b>	<b>11</b>
3.3.2. <b>Pendopingan .....</b>	<b>13</b>
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>15</b>
4.1. <b>Pengujian dan Pembahasan Hasil Pembukaan <i>Diffusion Window Wafer Silicon on Insulator (SOI)</i> .....</b>	<b>15</b>
4.2. <b>Hasil Analisis Doping Tipe-P Silicon Wafer Tipe-N dengan I-V Sweep Characteristics .....</b>	<b>17</b>
4.3. <b>Hasil Analisis Doping Tipe-P Silicon Wafer Tipe-N dengan Voltage Reverse I-V Characteristics .....</b>	<b>21</b>
<b>BAB 5 KESIMPULAN.....</b>	<b>23</b>
5.1. <b>Kesimpulan .....</b>	<b>23</b>
<b>DAFTAR REFERENSI.....</b>	<b>24</b>

## **DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2-1 P-N Diode [2] .....	3
Gambar 2-2 Maskless Photolithography [3].....	4
Gambar 2-3 Silicon Wafer [4] .....	4
Gambar 2-4 Doping Semikonduktor [5].....	5
Gambar 2-5 I-V Curve of P-N Diode [6] .....	6
Gambar 3-1 Diagram Alir Eksperimen Fabrikasi P-N Diode .....	7
Gambar 3-2 Konfigurasi Laser untuk Pembukaan Window .....	9
Gambar 3-3 Etimaden Boric Acid Technical Grade .....	12
Gambar 3-4 Penimbangan dan Pengadukan Larutan Asam Boron .....	12
Gambar 3-5 Pembukaan Window Silicon Wafer dengan Parameter Laser Paling Optimal .....	13
Gambar 3-6 Pemerataan Asam Borat pada Silicon Wafer .....	14
Gambar 3-7 Doping Silicon Wafer dengan Asam Borat .....	14
Gambar 3-8 Pembukaan Window Silicon Wafer untuk Bagian Tipe-N .....	14
Gambar 4-1 Wafer Silicon yang telah dilakukan pembukaan diffusion window.....	16
Gambar 4-2 Pengujian I-V Characteristics.....	17
Gambar 4-3 Tampilan P-N Diode pada Mikroskop .....	17
Gambar 4-4 Semiconductor Parameter Analyzer .....	18
Gambar 4-5 Grafik I-V Sweep Characteristics Curve .....	19
Gambar 4-6 Voltage Reverse I-V Characteristics .....	21

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 4-1 Tabel Variasi Parameter Pembukaan Diffusion Window Wafer Silicon on Insulator .....	15
Tabel 4-2 Hasil Pengujian Hot Point Probe Pada Silicon Wafer .....	16

## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang**

Litografi memiliki peranan krusial dalam proses pembuatan pola mikro dan nano pada material semikonduktor, yang mendukung perkembangan teknologi elektronik modern. Proses ini menjadi inti dari pendekatan planar, di mana pola diciptakan dan kemudian ditransfer ke permukaan target. Berdasarkan prinsipnya, litografi terbagi menjadi dua jenis, yakni litografi berbasis masker (mask-based lithography) dan litografi tanpa masker (maskless lithography) [1]. Litografi berbasis masker bekerja dengan mereplikasi pola yang telah dibuat sebelumnya menggunakan masker atau templat. Proses ini mirip dengan metode pencetakan tradisional yang mengandalkan master cetak untuk produksi skala besar. Meskipun efisien dalam produksi masif, pendekatan ini kurang fleksibel dalam menangani desain yang membutuhkan penyesuaian cepat [1]. Sebaliknya, litografi tanpa masker lebih fleksibel karena memungkinkan pembuatan pola langsung pada substrat tanpa menggunakan masker fisik. Teknik ini dapat dibandingkan dengan pencetakan dokumen menggunakan printer komputer, di mana desain dapat dimodifikasi dengan mudah sesuai kebutuhan. Oleh karena itu, maskless lithography sangat cocok untuk penelitian, pengembangan, produksi volume rendah, serta manufaktur yang memerlukan variasi pola atau perubahan desain secara cepat [1].

Dalam konteks fabrikasi dioda PN, penerapan maskless photolithography menawarkan banyak keunggulan, seperti presisi tinggi, efisiensi waktu, serta biaya produksi yang lebih rendah. Teknologi ini memanfaatkan cahaya sebagai sumber energi untuk menciptakan pola langsung pada wafer silikon. Proses ini memungkinkan doping boron secara tepat guna membentuk lapisan P pada dioda, dengan hasil yang lebih fleksibel dan inovatif dibandingkan metode litografi berbasis masker [1]. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan teknologi maskless photolithography dalam pembuatan dioda PN menggunakan doping boron.

#### **1.2. Rumusan Masalah**

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana metode doping tipe-P pada semikonduktor silikon tipe-N dapat dilakukan menggunakan teknik maskless photolithography berbasis laser?
2. Bagaimana hasil yang diperoleh dari proses doping tipe-P pada semikonduktor silikon tipe-N dengan menggunakan teknik maskless photolithography berbasis laser?

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari eksperimen yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mengimplementasikan metode doping tipe-P pada semikonduktor silikon tipe-N dengan menggunakan teknik maskless photolithography berbasis laser.
2. Menganalisis hasil doping tipe-P pada semikonduktor silikon tipe-N yang dilakukan melalui teknik maskless photolithography berbasis laser.

### **1.4. Batasan Penelitian**

Batasan eksperimen yang dilakukan adalah sebagai berikut:

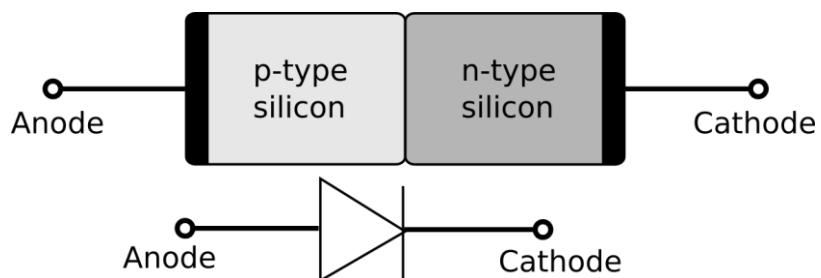
1. Parameter laser yang divariasikan hanya daya dan frekuensi laser. Parameter lain seperti kecepatan dipertahankan pada nilai 500 mm/s dan jumlah loop sebanyak 1 kali.
2. Pengujian I-V Sweep Characteristics hanya berada pada rentang 0 s.d. 6 V dengan step 0.1 V, sedangkan Pengujian I-V Voltage Reverse hanya pada rentang -5 s.d. 0 V dengan step 0.05 V.

## BAB 2

### STUDI LITERATUR

#### 2.1. Dioda

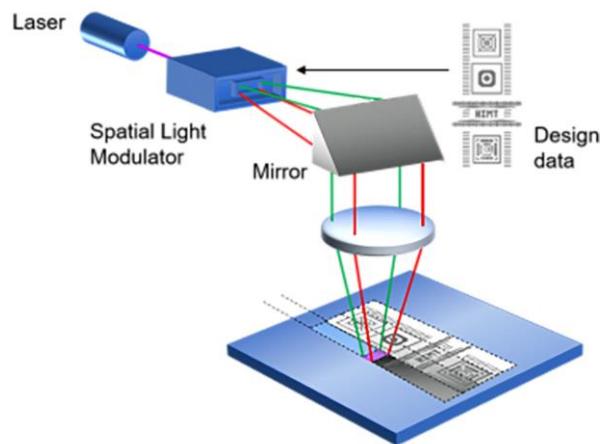
Dioda adalah komponen elektronik yang berfungsi sebagai penyearah arus, memungkinkan arus listrik mengalir hanya dalam satu arah. Dioda terdiri dari sambungan semikonduktor tipe-P dan tipe-N yang membentuk junction PN. Ketika dioda diberi tegangan maju (forward bias), elektron dan hole bergerak menuju junction, memungkinkan arus mengalir. Sebaliknya, pada tegangan mundur (reverse bias), arus dihentikan kecuali terdapat arus bocor yang sangat kecil. Dioda memiliki berbagai aplikasi, seperti dalam penyearah, pengaturan tegangan, dan deteksi sinyal.



Gambar 2-1 P-N Diode [2]

#### 2.2. *Maskless Photolithography*

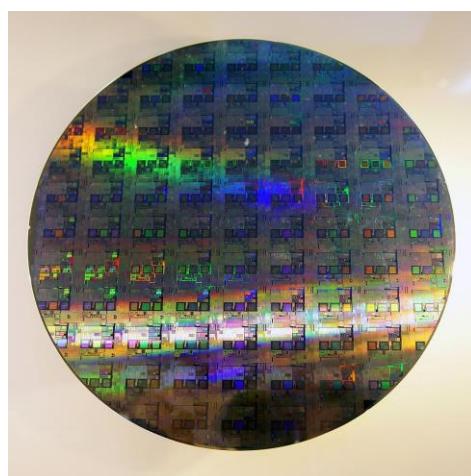
. Maskless photolithography adalah teknik litografi yang tidak menggunakan masker untuk memindahkan pola ke substrat. Metode ini menggunakan sinar laser atau sumber cahaya terfokus lainnya untuk secara langsung memaparkan pola pada lapisan fotosensitif. Keunggulan teknik ini adalah fleksibilitas dalam desain pola, pengurangan biaya pembuatan masker, dan kemampuan untuk memproses pola dengan resolusi tinggi. Maskless photolithography sering digunakan dalam proses fabrikasi semikonduktor, mikroelektromekanik, dan aplikasi mikrofabrikasi lainnya.



Gambar 2-2 Maskless Photolithography [3]

### 2.3. *Silicon Wafer*

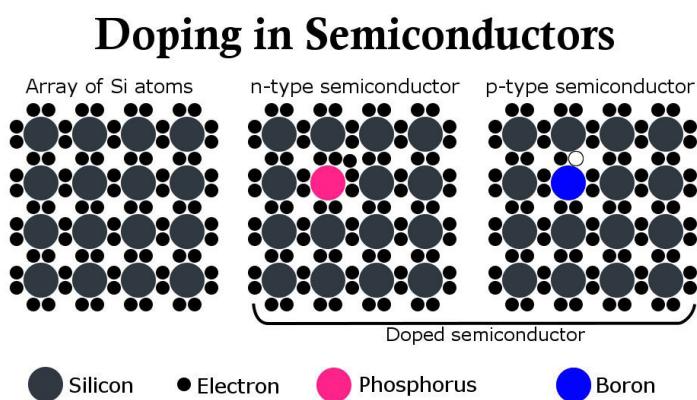
Silicon wafer adalah substrat dasar yang digunakan dalam proses fabrikasi semikonduktor. Wafer silikon dibuat melalui proses pemurnian silikon mentah menjadi silikon monokristal, biasanya menggunakan metode Czochralski atau float zone. Wafer ini kemudian dipotong, dipoles, dan dibersihkan untuk menghasilkan permukaan yang halus dan bebas kontaminasi. Silicon wafer merupakan bahan utama dalam pembuatan perangkat elektronik seperti dioda, transistor, dan rangkaian terpadu (IC).



Gambar 2-3 Silicon Wafer [4]

## 2.4. Doping

Doping adalah proses penambahan impuritas tertentu ke dalam semikonduktor untuk mengubah sifat kelistrikkannya. Pada semikonduktor tipe-N, atom donor seperti fosfor atau arsenik ditambahkan untuk meningkatkan jumlah elektron sebagai pembawa muatan mayoritas. Sedangkan pada semikonduktor tipe-P, atom akseptor seperti boron ditambahkan untuk meningkatkan jumlah hole sebagai pembawa muatan mayoritas. Proses doping dapat dilakukan melalui beberapa metode, seperti difusi termal, implantasi ion, atau teknik litografi seperti maskless photolithography.



Gambar 2-4 Doping Semikonduktor [5]

## 2.5. Boron

Boron adalah elemen kimia yang sering digunakan sebagai dopan untuk menghasilkan semikonduktor tipe-P. Atom boron memiliki tiga elektron valensi, sehingga dapat menciptakan hole ketika menggantikan atom silikon dalam struktur kristal. Boron biasanya ditambahkan ke silikon melalui proses doping dengan metode seperti difusi gas boron, implantasi ion boron, atau penggunaan bahan solid source boron. Karakteristik boron sebagai dopan memungkinkan kontrol yang presisi terhadap konsentrasi hole dalam semikonduktor.

## 2.6. Hot Point Probe

Hot point probe adalah teknik sederhana untuk menentukan jenis doping (tipe-P atau tipe-N) pada semikonduktor. Metode ini melibatkan penggunaan dua probe, salah

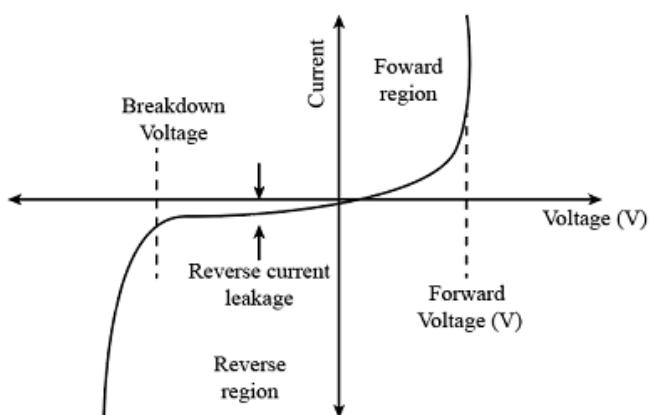
satunya dipanaskan, yang diletakkan pada permukaan semikonduktor. Ketika ujung yang dipanaskan menyentuh semikonduktor, gradien suhu menyebabkan pembawa muatan bergerak, menciptakan tegangan listrik. Polaritas tegangan yang dihasilkan menunjukkan jenis doping material, apakah tipe-P (hole sebagai pembawa mayoritas) atau tipe-N (elektron sebagai pembawa mayoritas). Teknik ini sering digunakan karena murah dan mudah diterapkan.

### 2.7. I-V Characteristics Curve

I-V Characteristics Curve adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara arus listrik ( $I$ ) yang mengalir melalui suatu komponen elektronik dengan tegangan listrik ( $V$ ) yang diberikan pada komponen tersebut. Grafik ini digunakan untuk memahami sifat kelistrikan dari berbagai komponen dan menjadi dasar dalam analisis sirkuit elektronik. Komponen seperti resistor, dioda, transistor, dan photovoltaic (PV) cell memiliki kurva karakteristik arus-tegangan yang khas. Resistor, misalnya, memiliki grafik linear sesuai dengan Hukum Ohm,

$$V = IR \dots (1)$$

sementara dioda menunjukkan sifat non-linear, dengan arus yang meningkat signifikan setelah melewati tegangan ambang pada forward bias. Transistor memiliki grafik yang lebih kompleks tergantung pada konfigurasi rangkaian, sedangkan PV cell menunjukkan hubungan antara arus yang dihasilkan dan tegangan berdasarkan intensitas cahaya, yang sering digunakan untuk menentukan titik daya maksimum.

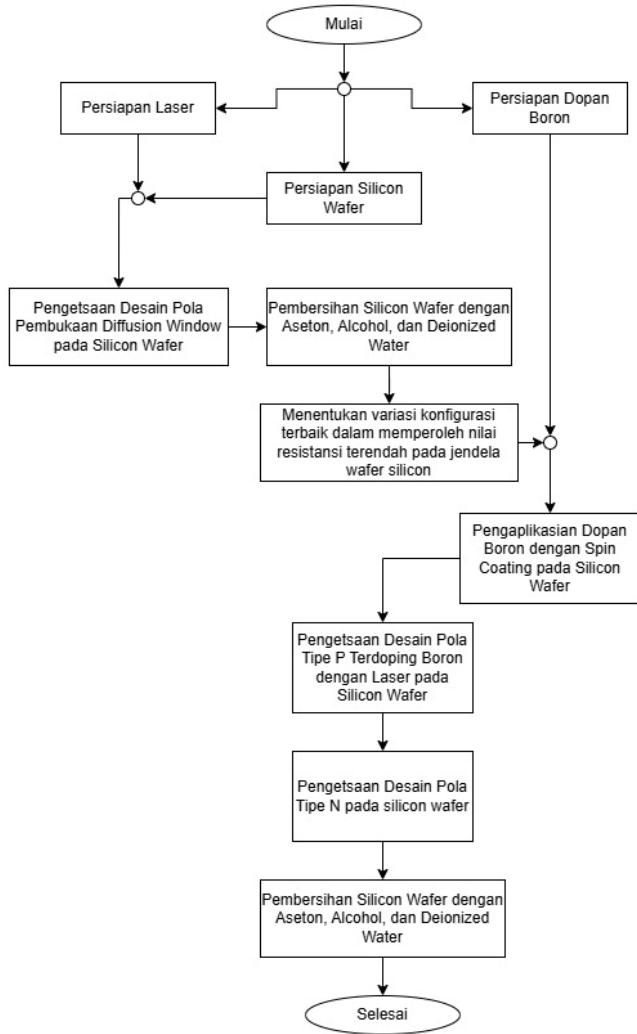


Gambar 2-5 I-V Curve of P-N Diode [6]

## BAB 3

### DESAIN EKSPERIMENT

#### 3.1. Alur Kerja Eksperimen



Gambar 3-1 Diagram Alir Eksperimen Fabrikasi P-N Diode

Eksperimen fabrikasi P-N diode dimulai dengan persiapan menyeluruh terhadap perangkat dan bahan yang akan digunakan. Proses ini bertujuan untuk menciptakan junction P-N melalui teknik doping tipe-P menggunakan boron pada silicon wafer tipe-N. Metode maskless photolithography digunakan untuk mempermudah pembuatan pola tanpa memerlukan masker fotolitografi. Tahap pertama adalah persiapan laser, di mana

alat laser diatur dan dikalibrasi untuk menghasilkan intensitas dan fokus cahaya yang sesuai. Langkah ini penting untuk memastikan pola yang dibuat pada wafer silicon akurat dan konsisten. Selanjutnya, dilakukan persiapan silicon wafer sebagai substrat dasar. Wafer ini dibersihkan secara hati-hati untuk menghilangkan partikel debu, kontaminan, atau lapisan oksida alami yang dapat memengaruhi proses doping.

Kemudian, persiapan dopan boron dilakukan dengan mencampur bahan boron dalam larutan yang sesuai. Boron adalah elemen tipe-P yang akan digunakan untuk menciptakan daerah doping tipe-P pada silicon wafer tipe-N. Setelah persiapan dopan selesai, eksperimen dilanjutkan dengan pengetsaan desain pola pembukaan diffusion window menggunakan laser pada permukaan wafer. Diffusion window ini berfungsi sebagai area yang akan dikenai doping. Langkah berikutnya adalah pembersihan silicon wafer menggunakan aseton, alkohol, dan air deionisasi untuk memastikan tidak ada residu dari proses etsa. Setelah pembersihan, dilakukan penentuan variasi konfigurasi terbaik dalam menciptakan pola diffusion window dengan resistansi terendah. Hal ini melibatkan pengujian beberapa parameter proses seperti kecepatan laser dan waktu etsa.

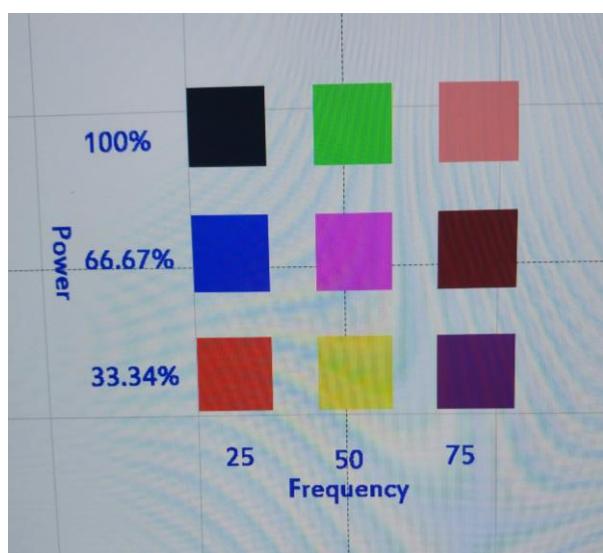
Tahap akhir adalah pembersihan wafer silicon kembali menggunakan aseton, alkohol, dan air deionisasi seperti pada langkah sebelumnya. Proses ini memastikan tidak ada sisa bahan atau residu dari etsa dan doping. Setelah semua tahapan selesai, eksperimen dinyatakan selesai, dengan silicon wafer yang telah mengalami doping tipe-P dan terbentuknya junction P-N siap untuk analisis lebih lanjut.

### **3.2. Proses Pembukaan Diffusion Window Wafer Silicon on Insulator (SOI)**

Proses pembukaan diffusion window pada wafer Silicon on Insulator (SOI) merupakan tahap penting dalam fabrikasi perangkat semikonduktor. Metode ini dilakukan dengan menggunakan laser berpulsa yang dapat menghasilkan pola presisi tinggi pada wafer. Parameter utama yang memengaruhi hasil proses adalah kecepatan, frekuensi, dan daya laser, yang masing-masing harus dioptimalkan agar proses pengeetsaan berjalan efektif tanpa merusak lapisan silikon. Setelah proses etsa selesai, dilakukan pengujian lebih lanjut untuk memastikan kualitas doping semikonduktor pada wafer. Salah satu metode yang digunakan adalah pengujian hot point probe.

Selanjutnya, wafer yang telah diuji menggunakan hot point probe diukur resistansinya menggunakan multimeter. Nilai resistansi ini digunakan untuk menentukan parameter laser terbaik, seperti kecepatan, frekuensi, dan daya, yang telah digunakan selama proses doping. Parameter laser yang optimal akan menghasilkan resistansi paling rendah, yang menunjukkan doping yang efisien dan pembawa muatan yang lebih tinggi. Resistansi yang rendah juga mencerminkan kontak yang baik antara lapisan silikon dan doping.

Penulisan nilai untuk daya laser pada software untuk maskless photolithography, format yang digunakan adalah dalam bentuk persentase (%), sementara nilai daya maksimum laser yang dapat diberikan adalah 30W. Sehingga, untuk merepresentasikan nilai daya dengan variasi sebagai berikut, 10W, 20W, dan 30W, maka dalam persen nilainya adalah sebagai berikut 33.34%, 66.67%, dan 100%.



Gambar 3-2 Konfigurasi Laser untuk Pembukaan Window

### 3.2.1. Tipe Silicon Wafer yang Digunakan

Tipe silikon yang digunakan pada penelitian ini adalah wafer silikon tipe-N dengan orientasi kristal (100). Wafer silikon dengan spesifikasi ini dipilih karena memiliki rasio biaya terhadap performa yang baik, sehingga cocok untuk penelitian. Orientasi (100) pada wafer silikon memberikan keunggulan dalam proses fotolitografi, karena sifat kristalnya yang mendukung pembuatan pola dengan presisi tinggi. Selain itu,

doping tipe-N pada wafer ini memastikan kompatibilitas yang optimal dengan proses doping tipe-P menggunakan boron, sehingga junction P-N yang terbentuk memiliki karakteristik listrik yang sesuai. Wafer silikon tersebut dikemas dalam kemasan kedap udara untuk menjaga kualitas material hingga saat penggunaannya dalam eksperimen.

### 3.2.2. Parameter Laser untuk Pembukaan *Diffusion Window SOI*

#### 3.2.2.1. Kecepatan Laser

Kecepatan laser menentukan laju pemindaian laser pada permukaan wafer dan diukur dalam milimeter per detik (mm/s). Pada eksperimen ini, kecepatan laser dibuat dalam nilai yang tetap yaitu 500 mm/s.

#### 3.2.2.2. Daya Laser

Daya laser menunjukkan jumlah energi yang dipancarkan per detik, dengan daya maksimum laser yang digunakan sebesar 30 watt. Dalam eksperimen, daya laser dikonfigurasikan pada rentang 10–30 watt dengan interval 10 watt untuk mengidentifikasi pengaturan daya yang optimal.

#### 3.2.2.3. Frekuensi Laser

Frekuensi laser mengacu pada jumlah pulsa yang ditembakkan per detik, dinyatakan dalam kilohertz (kHz). Laser yang digunakan memiliki rentang frekuensi 20–80 kHz dengan interval pengaturan sebesar 20 kHz. Frekuensi memengaruhi tingkat detail pola yang dihasilkan, di mana frekuensi lebih tinggi digunakan untuk menciptakan pola yang lebih halus dan presisi. Konfigurasi frekuensi yang digunakan yaitu berada pada rentang 25–75 kHz dengan step 25 kHz untuk mengidentifikasi settingan frekuensi terbaik.

#### 3.2.2.4. Jumlah Looping Laser

Jumlah looping laser adalah parameter tambahan yang merujuk pada berapa kali laser melakukan pemindaian ulang pada pola yang sama. Parameter ini memainkan peran penting dalam memastikan kedalaman etsa yang konsisten dan sesuai spesifikasi. Pada eksperimen ini, jumlah looping diatur pada nilai yang tetap yaitu 1 kali.

### 3.3. Proses Doping Silicon Wafer

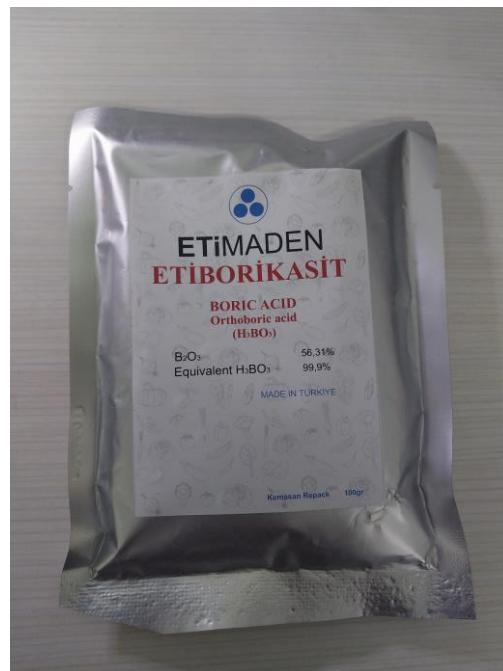
Proses doping pada silicon wafer merupakan tahap penting dalam pembentukan perangkat semikonduktor. Tahap ini bertujuan untuk memberikan karakteristik listrik

tertentu pada wafer silikon dengan menambahkan dopan, yaitu material yang dapat meningkatkan konduktivitas. Dalam penelitian ini, doping dilakukan dengan boron pada wafer silikon tipe-N untuk menciptakan junction P-N. Proses ini mencakup dua langkah utama, yaitu pembuatan dopan dan pendopingan.

### 3.3.1. Pembuatan Dopan

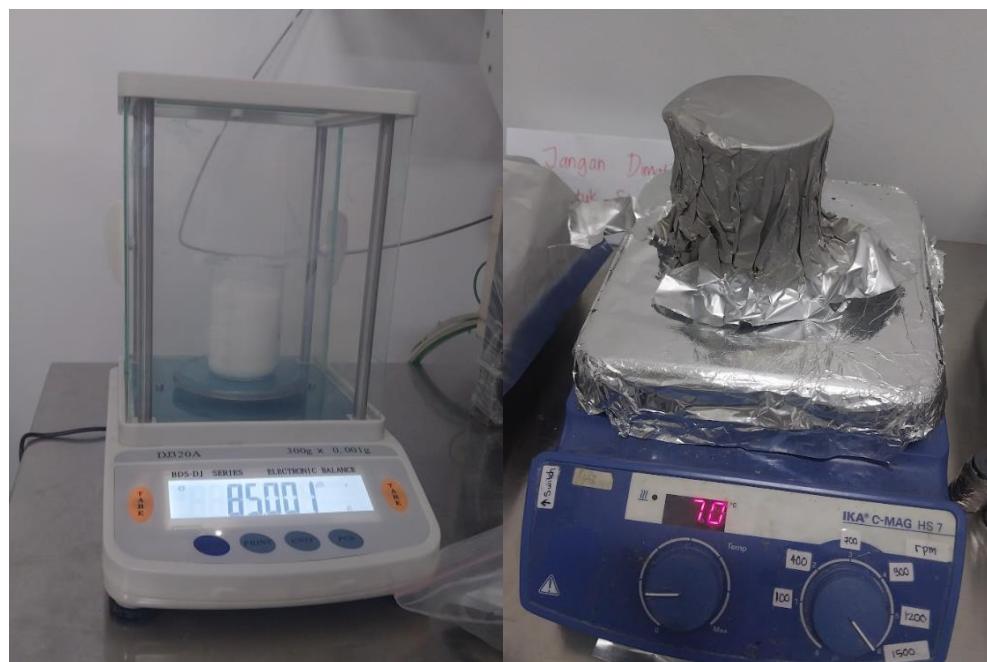
Dopan yang digunakan adalah larutan asam borat dengan konsentrasi 85% yang dibuat dengan mencampurkan bubuk asam borat dan air deionisasi. Konsentrasi 85% merujuk pada massa per volume, di mana 85 gram asam borat dilarutkan dalam larutan 100 mL[7]. Langkah-langkah pembuatan dopan meliputi:

1. Mengukur massa asam borat: Dibutuhkan 85 gram bubuk asam borat, yang ditimbang menggunakan timbangan presisi dengan akurasi 0,01 gram.
2. Melarutkan asam borat: Bubuk asam borat dimasukkan ke dalam wadah yang dapat menampung lebih dari 100 mL. Air deionisasi kemudian ditambahkan sedikit demi sedikit sambil diaduk.
3. Pengadukan: Campuran diaduk dengan pengaduk magnetik hingga asam borat sepenuhnya larut.
4. Pendopingan: Setelah larutan tercampur, larutan dapat diaplikasikan pada silicon wafer yang telah dilakukan pembukaan window untuk proses doping.



Gambar 3-3 Etimaden Boric Acid Technical Grade

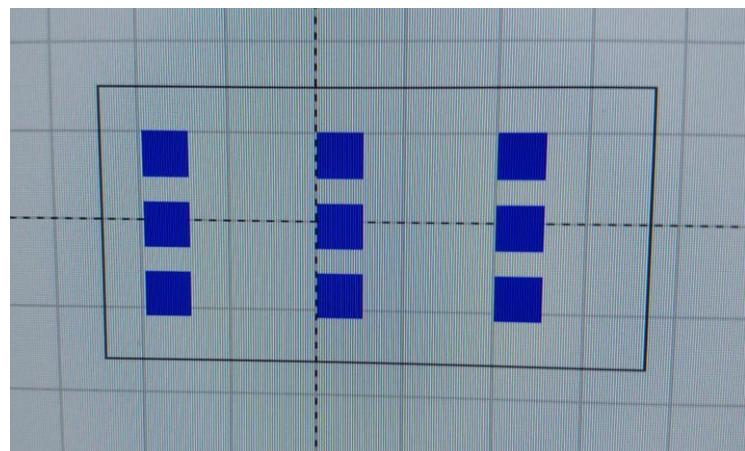
Asam borat yang digunakan adalah technical grade, memastikan kemurnian cukup untuk keperluan penelitian.



Gambar 3-4 Penimbangan dan Pengadukan Larutan Asam Boron

### 3.3.2. Pendopingan

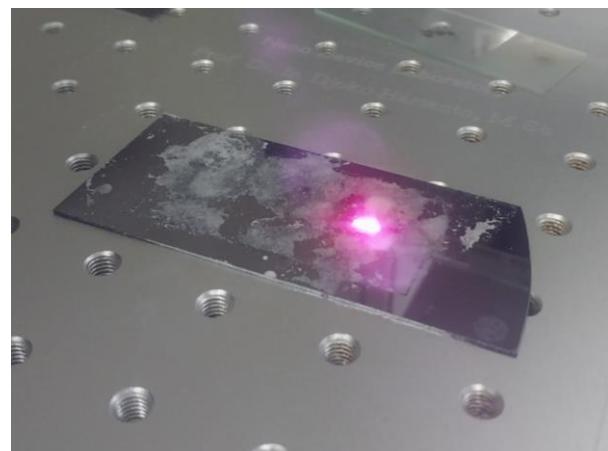
Pendopingan dimulai dengan pemberian larutan asam borat 85% pada permukaan wafer silikon tipe-N yang telah melalui proses etsa dengan parameter laser dengan konfigurasi paling optimal untuk membuka diffusion window. Karena larutan berbentuk semipadat seperti pasta, aplikasi dilakukan dengan meratakan larutan menggunakan spin coater dan spatula laboratorium pada area wafer yang sesuai dengan desain pola etsa. Setelah permukaan wafer dilapisi dopan, proses dilanjutkan dengan pengeetsaan menggunakan pola desain untuk mendistribusikan dopan secara presisi di area yang telah ditentukan. Proses ini dilakukan dengan bantuan laser untuk memastikan pola doping memiliki kedalaman dan ketebalan yang sesuai. Tahap akhir pendopingan melibatkan pembersihan wafer silikon untuk menghilangkan residu dopan atau kontaminasi lainnya. Wafer dicuci menggunakan larutan pembersih seperti aseton dan metanol, diikuti dengan pembilasan menggunakan air deionisasi. Pembersihan ini penting untuk memastikan wafer siap untuk langkah proses fabrikasi berikutnya.



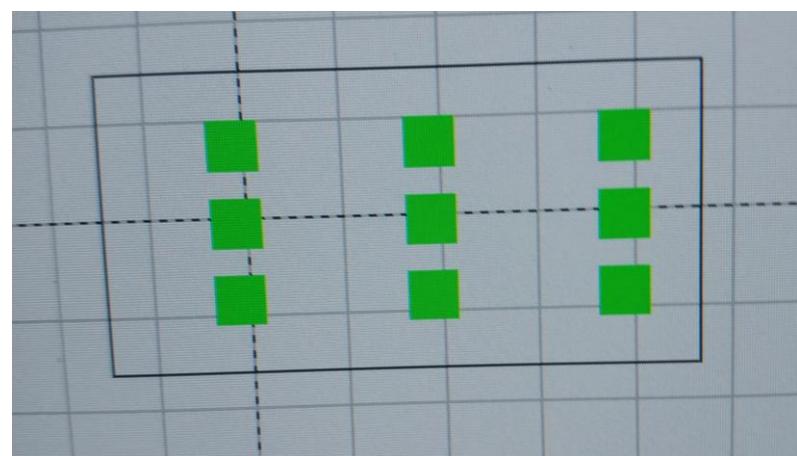
Gambar 3-5 Pembukaan Window Silicon Wafer dengan Parameter Laser Paling Optimal



Gambar 3-6 Pemerataan Asam Borat pada Silicon Wafer



Gambar 3-7 Doping Silicon Wafer dengan Asam Borat



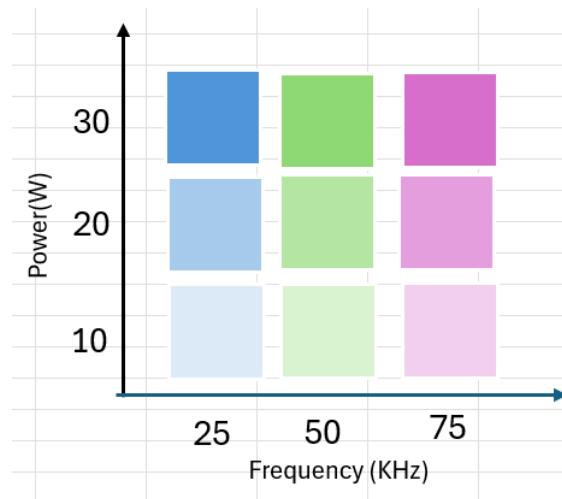
Gambar 3-8 Pembukaan Window Silicon Wafer untuk Bagian Tipe-N

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Pengujian dan Pembahasan Hasil Pembukaan *Diffusion Window Wafer Silicon on Insulator (SOI)*

Pengujian pembukaan diffusion window dilakukan dengan menggunakan variasi daya laser (30W, 20W, 10W) dan frekuensi laser (25 kHz, 50 kHz, 75 kHz). Hasil dari proses ini kemudian dievaluasi melalui pengukuran resistansi menggunakan multimeter untuk menentukan efektivitas parameter laser yang digunakan. Tabel menunjukkan bahwa kombinasi daya dan frekuensi laser memberikan pengaruh tertentu terhadap resistansi wafer setelah proses etsa.



	Column 1		Column 2		Column 3	
	Power (W)	Frequency (kHz)	Power (W)	Frequency (kHz)	Power (W)	Frequency (kHz)
Row 1	30	25	30	50	30	75
Row 2	20	25	20	50	20	75
Row3	10	25	10	50	10	75

Tabel 4-1 Tabel Variasi Parameter Pembukaan Diffusion Window Wafer Silicon on Insulator



Gambar 4-1 Wafer Silicon yang telah dilakukan pembukaan diffusion window

Pada daya tertinggi (30W), resistansi bervariasi signifikan dengan perubahan frekuensi. Resistansi tertinggi tercatat pada frekuensi 25 kHz ( $8.77 \text{ M}\Omega$ ), sementara resistansi menurun drastis pada frekuensi 50 kHz ( $0.651 \text{ M}\Omega$ ) dan sedikit meningkat pada frekuensi 75 kHz ( $0.785 \text{ M}\Omega$ ). Hal ini menunjukkan bahwa daya tinggi pada frekuensi rendah menghasilkan efek doping yang tidak optimal, kemungkinan disebabkan oleh overheating atau kerusakan lokal pada lapisan silikon. Frekuensi 50 kHz tampaknya menjadi titik optimal untuk daya 30W, menghasilkan resistansi terendah, yang mencerminkan kualitas doping yang baik. Sedangkan pada daya 20W, resistansi juga menurun seiring peningkatan frekuensi. Pada frekuensi 25 kHz, resistansi tercatat sebesar  $2.294 \text{ M}\Omega$ , sementara pada frekuensi 50 kHz menurun menjadi  $1.75 \text{ M}\Omega$ , dan mencapai nilai terendah pada 75 kHz sebesar  $0.444 \text{ M}\Omega$ . Penurunan resistansi ini menunjukkan bahwa pada daya menengah, efek doping lebih baik pada frekuensi tinggi. Daya 20W pada 75 kHz menghasilkan doping yang lebih seragam dan lebih efisien dibandingkan dengan daya yang lebih tinggi. Untuk daya terendah (10W), resistansi relatif stabil meskipun ada variasi frekuensi. Resistansi tertinggi tercatat pada 25 kHz ( $0.58 \text{ M}\Omega$ ), diikuti oleh 50 kHz ( $0.592 \text{ M}\Omega$ ), dan 75 kHz ( $0.537 \text{ M}\Omega$ ). Nilai resistansi yang relatif rendah pada daya ini menunjukkan bahwa daya rendah lebih menghindarkan overheating atau kerusakan material, tetapi kualitas doping yang dihasilkan cenderung lebih moderat dibandingkan daya yang lebih tinggi.

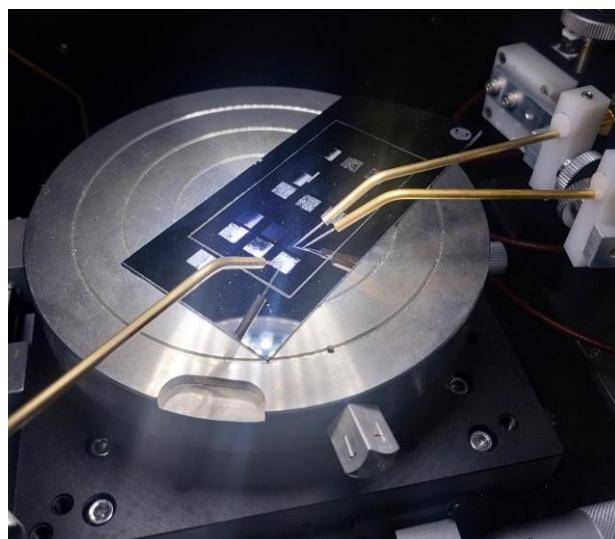
	<b>Column 1 (<math>\text{M}\Omega</math>)</b>	<b>Column 2 (<math>\text{M}\Omega</math>)</b>	<b>Column 3 (<math>\text{M}\Omega</math>)</b>
<b>Row 1</b>	8.77	0.651	0.785
<b>Row 2</b>	2.294	1.75	0.444
<b>Row3</b>	0.58	0.592	0.537

Tabel 4-2 Hasil Pengujian Hot Point Probe Pada Silicon Wafer

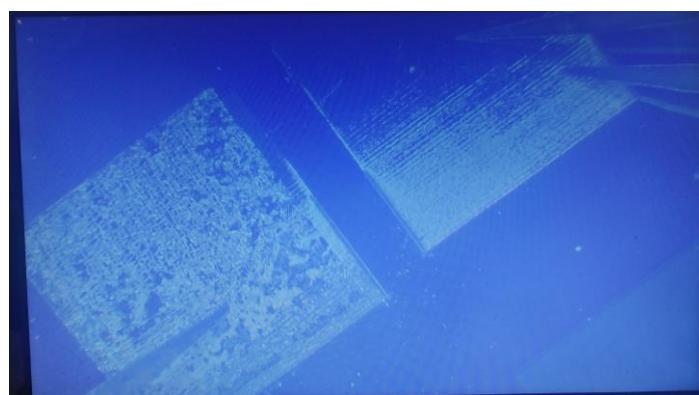
Berdasarkan hasil di atas, kombinasi daya 20W dan frekuensi 75 kHz dapat dianggap sebagai parameter optimal untuk proses pembukaan diffusion window pada wafer SOI. Kombinasi ini menghasilkan resistansi paling rendah, mencerminkan doping yang efisien tanpa risiko overheating atau kerusakan material.

#### **4.2. Hasil Analisis Doping Tipe-P Silicon Wafer Tipe-N dengan I-V Sweep Characteristics**

Penelitian ini dilakukan pada 9 sampel P-N diode yang disusun dalam bentuk matriks 3x3 dari posisi (1,1) hingga (3,3). Setiap P-N diode dianalisis melalui karakteristik I-V Sweep untuk mengevaluasi performa, kualitas fabrikasi, dan potensi penyebab ketidaksesuaian melalui Semiconductor Parameter Analyzer.



Gambar 4-2 Pengujian I-V Characteristics

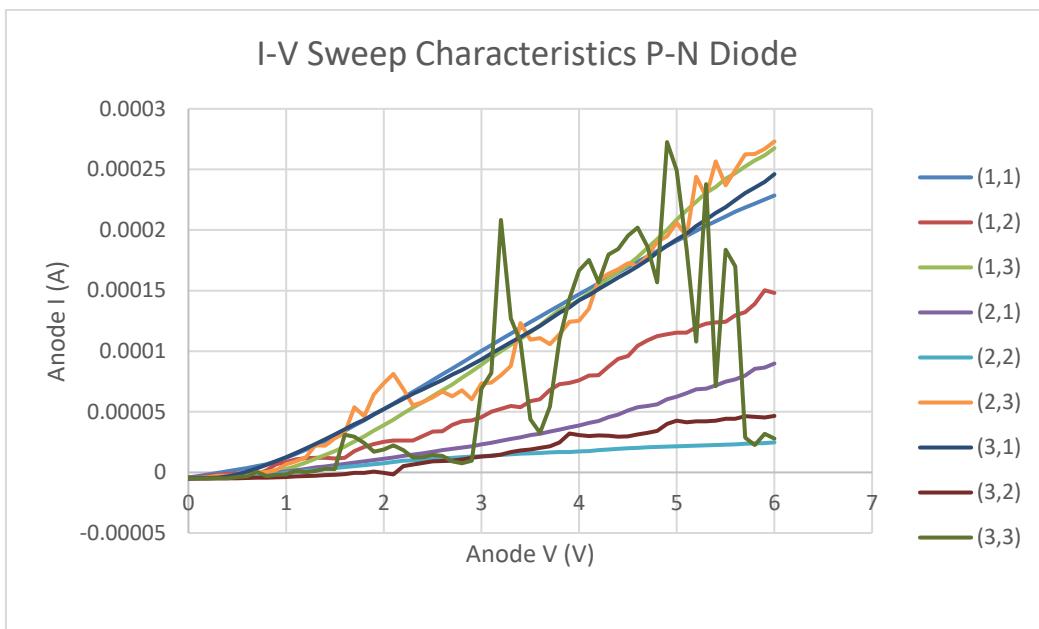


Gambar 4-3 Tampilan P-N Diode pada Mikroskop



Gambar 4-4 Semiconductor Parameter Analyzer

Analisis karakteristik I-V pada matriks 3x3 sampel *P-N diode* yang dihasilkan dari doping tipe-P silicon wafer tipe-N menunjukkan perbedaan kinerja antara posisi sampel. Sampel dioda pada posisi (1,1), (1,3), dan (3,1) menunjukkan performa paling mendekati karakteristik ideal dengan grafik I-V yang eksponensial pada kondisi forward bias. Arus meningkat secara bertahap seiring dengan kenaikan tegangan, namun laju peningkatan arus lebih lambat dibandingkan dioda ideal. Selain itu, terdapat kebocoran arus kecil pada tegangan rendah, yang mengindikasikan adanya defect atau impuritas dalam fabrikasi. Pada tegangan tinggi, peningkatan arus tidak tajam, yang mengarah pada kemungkinan resistansi tinggi atau kualitas kontak yang kurang baik. Meskipun demikian, dioda pada kelompok ini lebih stabil dibandingkan sampel lainnya.



Gambar 4-5 Grafik I-V Sweep Characteristics Curve

Sebaliknya, sampel dioda pada posisi (2,3), (3,2), dan (3,3) menunjukkan performa yang jauh dari karakteristik ideal. Grafik I-V memperlihatkan peningkatan arus yang lambat dan tidak teratur dengan fluktuasi yang signifikan. Ketidakstabilan ini mengindikasikan kemungkinan masalah pada kualitas sambungan pn, resistansi kontak tinggi, atau noise selama pengukuran. Selain itu, kebocoran arus yang cukup besar terdeteksi pada tegangan rendah, menunjukkan kelemahan dalam fabrikasi junction. Karakteristik ini mengindikasikan bahwa dioda pada posisi tersebut mengalami masalah signifikan, seperti doping yang tidak optimal, resistansi tinggi, atau defek struktural.

Sisa sampel lainnya, yang mencakup posisi selain dua kelompok tersebut, menunjukkan karakteristik di antara keduanya. Grafik I-V pada kelompok ini memperlihatkan fluktuasi arus, meskipun tidak sebesar yang diamati pada kelompok (2,3), (3,2), dan (3,3). Peningkatan arus pada forward bias lebih lambat dibandingkan kelompok (1,1), (1,3), dan (3,1), tetapi lebih konsisten dan stabil dibandingkan kelompok dengan performa terburuk. Kebocoran arus juga terdeteksi, tetapi nilainya lebih kecil dibandingkan kelompok terburuk. Dioda pada kelompok ini menunjukkan performa moderat, tidak optimal tetapi masih cukup baik untuk beberapa aplikasi tertentu.

Analisis karakteristik I-V pada matriks 3x3 sampel *P-N diode* yang dihasilkan dari doping tipe-P silicon wafer tipe-N menunjukkan perbedaan kinerja antara posisi sampel. Sampel dioda pada posisi (1,1), (1,3), dan (3,1) menunjukkan performa mendekati karakteristik ideal dengan grafik I-V yang eksponensial pada kondisi forward bias. Arus meningkat secara bertahap seiring dengan kenaikan tegangan, namun laju peningkatan arus lebih lambat dibandingkan dioda ideal. Selain itu, terdapat kebocoran arus kecil pada tegangan rendah, yang mengindikasikan adanya defect atau impuritas dalam fabrikasi. Pada tegangan tinggi, peningkatan arus tidak tajam, yang mengarah pada kemungkinan resistansi seri tinggi atau kualitas kontak yang kurang baik. Meskipun demikian, dioda pada kelompok ini lebih stabil dibandingkan sampel lainnya.

Sebaliknya, sampel dioda pada posisi (2,3), (3,2), dan (3,3) menunjukkan performa yang jauh dari karakteristik ideal. Grafik I-V memperlihatkan peningkatan arus yang lambat dan tidak teratur dengan fluktuasi yang signifikan. Ketidakstabilan ini mengindikasikan kemungkinan masalah pada kualitas sambungan pn, resistansi kontak tinggi, atau noise selama pengukuran. Selain itu, kebocoran arus yang cukup besar terdeteksi pada tegangan rendah, menunjukkan kelemahan dalam fabrikasi junction. Karakteristik ini mengindikasikan bahwa dioda pada posisi tersebut mengalami masalah signifikan, seperti doping yang tidak optimal, resistansi tinggi, atau defek struktural.

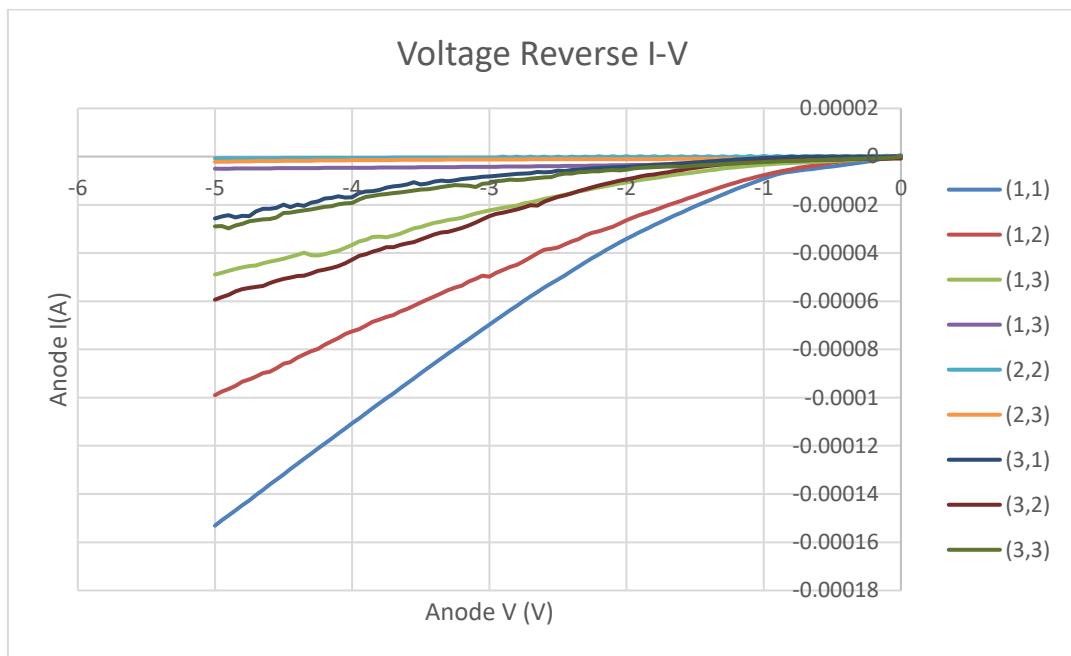
Sisa sampel lainnya, yang mencakup posisi selain dua kelompok tersebut, menunjukkan karakteristik di antara keduanya. Grafik I-V pada kelompok ini memperlihatkan fluktuasi arus, meskipun tidak sebesar yang diamati pada kelompok (2,3), (3,2), dan (3,3). Peningkatan arus pada forward bias lebih lambat dibandingkan kelompok (1,1), (1,3), dan (3,1), tetapi lebih konsisten dan stabil dibandingkan kelompok dengan performa terburuk. Kebocoran arus juga terdeteksi, tetapi nilainya lebih kecil dibandingkan kelompok terburuk. Dioda pada kelompok ini menunjukkan performa moderat, tidak optimal tetapi masih cukup baik untuk beberapa aplikasi tertentu.

Secara keseluruhan, performa paling ideal hanya sebagian tercapai pada kelompok (1,1), (1,3), dan (3,1), sementara kelompok lainnya menunjukkan berbagai keterbatasan. Masalah umum yang ditemukan meliputi kebocoran arus pada tegangan rendah, resistansi seri tinggi, dan fluktuasi arus yang mengindikasikan ketidakstabilan atau noise. Kemungkinan penyebabnya termasuk doping yang tidak seragam, kualitas kontak yang

buruk, dan noise selama pengukuran. Untuk meningkatkan kualitas dioda, perlu dilakukan optimasi proses doping untuk memastikan uniformitas konsentrasi pembawa, peningkatan kualitas kontak listrik untuk mengurangi resistansi seri, dan kalibrasi ulang alat pengukuran untuk meminimalkan noise.

#### 4.3. Hasil Analisis Doping Tipe-P Silicon Wafer Tipe-N dengan Voltage Reverse I-V Characteristics

Setiap sampel diuji menggunakan Voltage Reverse I-V Sweep untuk mengevaluasi perilaku arus balik (reverse current) terhadap tegangan terbalik (reverse voltage) hingga -5 V.



Gambar 4-6 Voltage Reverse I-V Characteristics

Sampel pada posisi (1,1), (1,2), dan (3,2) menunjukkan performa terbaik dalam reverse bias. Grafik I-V pada sampel ini memperlihatkan peningkatan arus negatif yang linear seiring bertambahnya tegangan negatif dari 0 V hingga -5 V. Arus balik tetap dalam kisaran mikroampere ( $\mu$ A) hingga miliampere rendah tanpa adanya lonjakan mendadak, menandakan tidak terjadinya breakdown. Kebocoran arus yang rendah dan stabilitas

grafik menunjukkan kualitas fabrikasi yang baik serta karakteristik isolasi yang sesuai dengan dioda ideal dalam reverse bias.

Sementara pada sampel pada posisi (1,3), (3,1), dan (3,3) memperlihatkan karakteristik I-V yang sedikit terjadi fluktuasi nilai. Mulai dari tegangan sekitar -3 V, grafik menunjukkan osilasi arus yang semakin signifikan dengan bertambahnya tegangan negatif. Fluktuasi ini diduga berasal dari noise atau ketidakstabilan alat pengujian, seperti koneksi yang buruk ataupun ketidakstabilan material dioda. Sedangkan pada sampel lainnya, yang meliputi posisi selain kedua kelompok tersebut, menunjukkan grafik I-V yang hampir mendatar tanpa kemiringan signifikan. Karakteristik ini mengindikasikan resistansi balik yang sangat tinggi. Grafik yang mendatar juga menunjukkan bahwa resistansi tinggi ini mungkin berasal dari doping yang kurang optimal, menghasilkan daerah deplesi yang terlalu lebar.

Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa sampel (1,1), (1,2), dan (3,2) memiliki karakteristik terbaik dengan perilaku arus yang stabil dan linear, sedangkan sampel (1,3), (3,1), dan (3,3) menunjukkan anomali berupa osilasi arus yang perlu dievaluasi lebih lanjut. Sampel lainnya menunjukkan isolasi tinggi tetapi mungkin kurang optimal untuk aplikasi dioda standar.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan eksperimen, pengujian, dan analisis yang dilakukan pada penelitian ini, dapat disimpulkan

1. Hasil analisis pembukaan diffusion window pada wafer Silicon on Insulator (SOI) menunjukkan bahwa daya laser dan frekuensi pulsa memengaruhi hasil doping dengan karakteristik tertentu. Pada daya 30W, resistansi terendah tercatat pada frekuensi 50 kHz, mencerminkan kualitas doping yang optimal pada parameter tersebut. Pada daya 20W, resistansi terus menurun dengan peningkatan frekuensi, menunjukkan efisiensi doping terbaik pada daya menengah di frekuensi 75 kHz. Sedangkan pada daya 10W, resistansi relatif stabil di semua frekuensi, mencerminkan minimnya kerusakan material meski kualitas doping yang dihasilkan lebih moderat. Konfigurasi daya dan frekuensi laser paling optimal tampak pada variasi daya 20W dan frekuensi 75 kHz dengan perolehan nilai resistansi sebesar  $0.444\ \Omega$ .
2. Hasil pengujian I-V Sweep menunjukkan variasi performa antar sampel *P-N diode*. Sampel (1,1), (1,3), dan (3,1) menunjukkan peningkatan arus eksponensial, meskipun lebih lambat dibandingkan dengan dioda ideal, serta resistansi seri yang tinggi membatasi performa dioda pada tegangan tinggi. Sampel (2,3), (3,2), dan (3,3) memperlihatkan fluktuasi signifikan pada arus, mencerminkan ketidakstabilan material atau noise pengukuran. Sementara itu, sampel lainnya menunjukkan karakteristik antara kedua kelompok tersebut, dengan fluktuasi arus lebih kecil namun kurva tetap tidak optimal.
3. Pada pengujian Voltage Reverse I-V, sampel (1,1), (1,2), dan (3,2) menunjukkan peningkatan arus negatif yang linear terhadap tegangan terbalik, tanpa indikasi breakdown hingga -5 V. Sebaliknya, sampel (1,3), (3,1), dan (3,3) menunjukkan osilasi arus pada tegangan di atas -3 V, kemungkinan akibat noise alat atau ketidakstabilan material. Sampel lainnya memiliki grafik arus yang hampir mendatar, tetapi respons terhadap tegangan bias rendah, mendekati karakteristik isolator.

## **DAFTAR REFERENSI**

- [1] M. E. Walsh, F. Zhang, R. Menon, and H. I. Smith, “6 - Maskless photolithography,” in *Nanolithography*, M. Feldman, Ed., Woodhead Publishing, 2014, pp. 179–193. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857098757.179>.
- [2] “p-n junction.” Accessed: Dec. 25, 2024. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/P%28n%29\\_n\\_junction](https://en.wikipedia.org/wiki/P%28n%29_n_junction)
- [3] “Maskless Photolithography.” Accessed: Dec. 25, 2024. [Online]. Available: <https://heidelberg-instruments.com/core-technologies/maskless-laser-lithography/>
- [4] “Silicon Wafer.” Accessed: Dec. 25, 2024. [Online]. Available: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/eb/12-inch\\_silicon\\_wafer.jpg/900px-12-inch\\_silicon\\_wafer.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/eb/12-inch_silicon_wafer.jpg/900px-12-inch_silicon_wafer.jpg)
- [5] Habib, “What is Semiconductor?” Accessed: Dec. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.iceeet.com/semiconductor/>
- [6] “I-V Curve.” Accessed: Dec. 25, 2024. [Online]. Available: <https://homework.study.com/explanation/sketch-the-i-v-curve-of-a-p-n-junction-elaborate-on-the-formation-of-the-asymmetric-curve.html>
- [7] M. G. Dirgantara, T. Abuzairi, and N. R. Poespawati, “P-type Doping on N-type Silicon Semiconductors by Using Laser-based Maskless Photolithography Method.”