



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERANCANGAN DAN SIMULASI *NANOSCALE-BASED*  
*SINGLE PHOTON AVALANCHE DIODE ON SILICON***

**TESIS**

**DEDY SEPTONO CATUR PUTRANTO  
0906495753**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JANUARI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERANCANGAN DAN SIMULASI *NANOSCALE BASED  
SINGLE PHOTON AVALANCHE DIODE ON SILICON***

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik**

**DEDY SEPTONO CATUR PUTRANTO  
0906495753**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
BIDANG KEKHUSUSAN DIVAIS ELEKTRONIKA  
DEPOK  
JANUARI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Dedy Septono Catur Putranto

NPM : 0906495753

Tanda Tangan : 

Tanggal : Januari 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

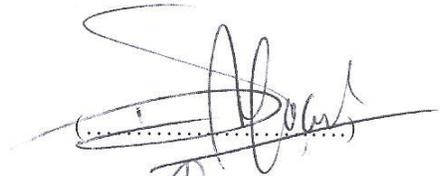
Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Dedy Septono Catur Putranto  
NPM : 0906495753  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Tesis : **PERANCANGAN DAN SIMULASI NANOSCALE-BASED  
SINGLE PHOTON AVALANCHE DIODE ON SILICON**

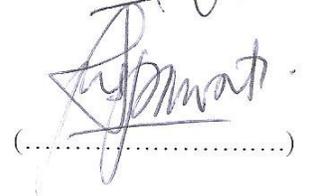
Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Kekhususan Divais Elektronika, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

## DEWAN PENGUJI

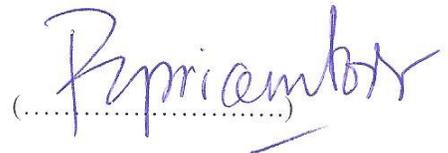
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, M.Sc.



Penguji : Prof. Dr. Ir. NR. Poespawati, MT.



Penguji : Dr. Ir. Purnomo Sidi Priambodo, MSEE.



Penguji : Dr. Ratno Nuryadi



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Januari 2011

## UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas selesainya penulisan tesis ini. Selain itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Bapak Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, M.Sc , selaku dosen pembimbing tesis, yang telah menentukan dan menyetujui tesis dengan judul : Perancangan dan Simulasi *Nanoscale-Based Single Photon Avalanche Diode on Silicon*, sebagai bagian dari riset pada *Sensor Device Research Group* (SDRG) dan telah memberikan banyak waktunya untuk memberikan petunjuk dan pengarahannya serta saran dalam penulisan tesis ini.
- (2) Lembaga Sandi Negara, yang telah membiayai saya.

Depok, Januari 2011



Dedy Septono Catur Putranto  
0906495753

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

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

Nama : Dedy Septono Catur Putranto  
NPM : 0906495753  
Program Studi : Magister  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Tesis

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

***Perancangan dan Simulasi Nanoscale-Based Single Photon Avalanche Diode on Silicon***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : Januari 2011  
Yang menyatakan



( Dedy Septono Catur Putranto )

## ABSTRAK

Nama : Dedy Septono Catur Putranto, ST  
Program Studi : Magister Teknik Elektro  
Judul : Perancangan dan Simulasi *Nanoscale-based Single Photon Avalanche Diode on Silicon*

Sampai saat ini riset untuk aplikasi *single photon timing* dan *single photon counting* masih terus dilakukan. Dalam perkembangan riset di bidang *single photon detector* dan *single photon generation* juga terus dilakukan, salah satu *single photon detector* berbahan silikon yang paling pesat perkembangannya adalah *Single Photon Avalanche Diode (SPAD)*. Riset terakhir mengenai SPAD dengan luas aktif area sebesar 120 nm menghasilkan *timing response* detektor sebesar 144 ps. Untuk menghasilkan rancangan struktur SPAD berbahan silikon dengan *timing response* dibawah 144 ps, maka pada tesis ini akan dirancang dan disimulasikan SPAD berskala nano untuk memperkecil aktif area.

Landasan perancangan adalah *heterostructure silicon nanowire* berdiameter 20 nm dengan struktur p-i-n sehingga diharapkan pada daerah deplesi akan terjadi peningkatan *carrier generation*. Dengan demikian proses distribusi *avalanche* oleh *carrier generation* setelah pemecuan foton tunggal semakin cepat sehingga *timing response* akan semakin cepat. Perhitungan *timing response* dipengaruhi oleh empat parameter, yaitu probabilitas foton yang diserap pada daerah netral ( $P_n$ ), waktu respon yang dibutuhkan elektron pada daerah deplesi untuk berdistribusi ke daerah sensitif detektor ( $P_{aval}(t)$ ), Fungsi  $\delta$  dan waktu difusi terbatas untuk *carrier photogenerated* di daerah netral ( $P_{diff}(t)$ ).

Dari analisa hasil simulasi perancangan terbukti bahwa dengan memperkecil luas daerah aktif SPAD dan membuat struktur p-i-n akan memperlebar daerah deplesi akan mempercepat *timing response* divais menjadi 30 ps sesuai dengan simulasi menggunakan MATLAB.

Kata kunci : *Single Photon Avalanche Diode (SPAD)*, *timing response*, *heterostructure silicon nanowire*, MATLAB.

## ABSTRACT

Name : Dedy Septono Catur Putranto, ST  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Design and Simulation Nanoscale-based Single Photon  
Avalanche Diode on Silicon

Nowadays researches for single photon timing and single photon counting application still continuously done. Concerning the research development in field of single photon detector and single photon generation is constantly also made, one of silicon single photon detector the most rapid development is Single Photon Avalanche Diode (SPAD). Recent research on the SPAD with an active area of 120 nm produces timing detector response of 144 ps. To produce silicone SPAD structure design with the response below 144 ps timing, so in this thesis will be designed and simulated nanoscale-based SPAD in order to reduce the active area.

The foundation design is hetrostructure silicon nanowire 20 nm in diameter with p-i-n structure which is expected in the depletion region will increase the carrier generation. Thus the process of distribution by the carrier avalanche generation after a single photon triggers the faster so that timing will be more rapid response. Calculation of response timing is influenced by four parameters, the probability of a photon is absorbed in the neutral region ( $P_n$ ), response time it takes electrons in the depletion region for distribution to the detector sensitive area ( $P_{aval}(t)$ ), function  $\delta$  and diffusion time is limited to carriers photogenerated in the neutral region ( $P_{diff}(t)$ ).

From the analysis of the design of the simulation's result, proved that by minimizing the SPAD active area and create a pin structure will widen the depletion region will accelerate the timing of the response device to be 30 ps according to the simulation using MATLAB.

Key word : *Single Photon Avalanche Diode (SPAD), timing response, hetrostructure silicon nanowire, MATLAB.*

## DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	iii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR ISTILAH.....	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penulisan .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Metodologi Penulisan.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 KARAKTERISTIK SINGLE PHOTON AVALANCHE DIODE.....	4
2.1 Dasar Teori Semikonduktor .....	4
2.2 Energi-Band Model Semikonduktor.....	5
2.3 Bond Model Semikonduktor .....	7
2.4 Donor dan Aseptor pada Semikonduktor .....	7
2.5 Generasi, Rekombinasi dan Life Time .....	8
2.6 Sifat Dasar P-N Junction.....	11
2.6.1 P-N Junction pada Keseimbangan Termal .....	11
2.6.2 Reverse bias P-N junction .....	12
2.7 Mekanisme Breakdown pada P-N Junction.....	15
2.7.1 Ketidakstabilan Suhu.....	15
2.7.2 Zener Breakdown (Tunneling).....	15

2.7.3 Avalanche Breakdown (ionisasi dampak) .....	15
2.8 Prinsip Kerja Single Photon Avalanche Diode.....	19
2.8.1 Pasive Quenching.....	20
2.8.2 Active Quenching.....	21
2.9 Karakteristik Foton Tunggal.....	21
2.10 Karakteristik Bahan Silikon.....	23
2.11 Karakteristik Silicon Nanowire .....	27
<b>BAB 3 PERANCANGAN NANOSCALE-BASED</b>	
<i>SINGLE PHOTON AVALANCHE DIODE ON SILICON</i> .....	30
3.1 Perancangan <i>Nanoscale-Based Single Photon Avalanche Diode</i> .....	30
3.2 Diagram Alir Proses Simulasi .....	33
3.3 Perancangan Simulasi <i>Nanoscale-Based Single Photon Avalanche</i> <i>Diode</i> .....	35
3.3.1 Perhitungan <i>Timing Response Avalanche</i> .....	35
3.3.2 Perhitungan Difusi <i>Carrier Photogenerated</i> .....	37
3.3.3 Perhitungan <i>Timing Response</i> .....	38
<b>BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA HASIL SIMULASI NANOSCALE-BASED</b>	
<i>SINGLE PHOTON AVALANCHE DIODE ON SILICON</i> .....	39
4.1 Perangkat Lunak MATLAB® .....	39
4.2 Simulasi <i>Nanoscale-Based Single Photon Avalanche Diode</i> .....	39
4.2.1 Perhitungan <i>Timing Response</i> Pasangan Elektron dan <i>Hole</i> Pada Saat Penyebaran <i>Avalanche</i> .....	40
4.2.2 Persamaan Difusi.....	43
4.2.3 Perhitungan <i>Timing Response</i> Divais.....	46
4.3 Data Eksperimen.....	46
4.4 Analisa Struktur p-i-n pada <i>Silicon Nanowire</i> .....	47
4.5 Analisa Konsentrasi Doping Tipe-n dan Tipe-p.....	48
<b>BAB 5 KESIMPULAN</b> .....	49
<b>DAFTAR REFERENSI</b> .....	50
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	: Perbandingan antara <i>Quantum Cryptography Paper</i> dengan <i>Single Photon Detector Paper</i> .....	1
Gambar 2.1	: Pita Energi dan Band Gap.....	6
Gambar 2.2	: Diagram pita energi <i>pn-junction</i> pada kesetimbangan termal.....	11
Gambar 2.3	: Daerah deplesi pada <i>pn-junction</i> .....	12
Gambar 2.4	: Diagram pita energi reverse-bias pada <i>pn-junction</i> .....	13
Gambar 2.5	: Kurva karakteristik volt-ampere dioda.....	14
Gambar 2.6	: Zener Breakdown (Tunneling).....	15
Gambar 2.7	: Fenomena <i>impact ionization</i> dan proses <i>avalanche multiplication</i> .....	16
Gambar 2.8	: Tegangan <i>breakdown</i> terhadap konsentrasi ketidakmurnian tipe n pada <i>pn junction</i> .....	18
Gambar 2.9	: Lebar daerah deplesi dan medan listrik maksimum pada <i>breakdown</i> terhadap konsentrasi ketidakmurnian tipe n pada <i>pn junction</i> .....	19
Gambar 2.10	: Model sirkuit untuk <i>pasive quenching</i> SPAD.....	21
Gambar 2.11	: Konfigurasi <i>Active Quenching Circuit</i> SPAD.....	22
Gambar 2.12	: Koefisien absorpsi, $\alpha$ , pada beberapa bahan semikonduktor pada temperatur 300° K sebagai fungsi panjang gelombang cahaya.....	23
Gambar 2.13	: Koefisien absorpsi Silikon pada temperatur 300 K.....	24
Gambar 2.14	: Indeks bias silikon sebagai fungsi panjang gelombang.....	24
Gambar 2.15	: Tingkat kedalaman penyerapan silikon sebagai fungsi panjang gelombang.....	25
Gambar 2.16	: Tingkat generasi pada silikon terhadap beberapa panjang gelombang.....	26
Gambar 2.17	: Laju generasi sebagai fungsi kedalaman sel.....	26
Gambar 2.18	: Struktur SiNW transistor.....	27
Gambar 2.19	: Skema dan Histogram ilustrasi pengendalian ukuran SiNW dari <i>nanoclusters</i> Au.....	28
Gambar 2.20	: Karakteristik <i>single crystalline</i> SiNW.....	29
Gambar 2.21	: Karakteristik I-V p-SiNW.....	29
Gambar 2.22	: Karakteristik I-V n-SiNW.....	29
Gambar 3.1	: Struktur p-i-n SiNW(a) Struktur p-i-n SiNW <i>heterostructure</i> (b) Struktur p-i-n dengan 3 SiNW.....	30
Gambar 3.2	: Struktur p-i-n SiNW <i>heterostructure</i> (a) <i>core shell and core multishell</i> (b) <i>nanowire superlattice</i> .....	31
Gambar 3.3	: a. Skema struktur p-i-n SiNW, pada bagian kuning merupakan katalis <i>nanoclusters</i> Au tempat penumbuhan sekuensial struktur p-i-n SiNW, b. Skema ilustrasi pergerakan elektron dan <i>hole</i> pada p-i-n SiNW dan c.	

	Diagram pita energi dari struktur p-i-n SiNW pada saat <i>reverse bias</i> .....	32
Gambar 3.4	: Skema rancangan <i>heterostructure silicon nanowire</i> .....	33
Gambar 3.5	: Skema <i>nanoscaled-base single photon avalanche diode</i> .....	33
Gambar 3.6	: Diagram Alir Simulasi.....	34
Gambar 3.7	: Skema model dari struktur divais yang digunakan.....	36
Gambar 3.8	: Simulasi pergerakan <i>carrier</i> dengan arah y diabaikan.....	36
Gambar 3.9	: Skema divais dengan diskriminator.....	38
Gambar 4.1	: <i>Setting</i> perangkat eksperimen <i>photon timing</i> .....	40
Gambar 4.2	: Grafik simulasi dari persamaan poisson.....	43
Gambar 4.3	: Grafik dari hasil simulasi persamaan difusi.....	45
Gambar 4.4	: Grafik hasil simulasi <i>timing response</i> divais.....	46
Gambar 4.5	: Data eksperimen p-i-n <i>heterostructure silicon nanowire</i> .....	47



## DAFTAR ISTILAH

Absorpsi	: penyerapan cahaya matahari oleh silikon.
Acceptor	: impuritas yang menerima sejumlah elektron dari semikonduktor.
Arus saturasi	: arus yang disebabkan oleh pembawa minoritas pada divais semikonduktor.
Avalanche	: kumulatif proses yang menyebabkan elektron di percepat oleh medan listrik yang kuat dan berbenturan dengan atom lain sehingga terjadi pelepasan elektron baru yang menghasilkan pasangan elektron-hole dan mengakibatkan benturan lainnya yang juga menghasilkan pasangan elektron-hole yang lain, proses ini juga disebut avalanche effect, avalanche multiplicaton, cumulative ionization.
Avalanche breakdown:	proses avalanche yang terjadi dikarenakan pemberian reverse-bias yang besar pada sambungan pn.
Daerah avalanche	: daerah deplesi yang mempunyai medan listrik tinggi (pada sambungan pn) dan merupakan daerah dihasilkan pasangan elektron-hole, atau disebut juga daerah injeksi.
Dark current	: arus saturasi pada photodiode.
Depletion region	: daerah di sekitar junction yang bebas dari muatan yang bergerak.
Diffusi	: pengotoran terhadap suatu semikonduktor untuk mendapatkan suatu tipe semikonduktor tertentu, misalnya untuk menghasilkan semikonduktor tipe p atau tipe n.
Diffusion length	: jarak yang ditempuh pembawa muatan selama life time.
Dipole	: pasangan ion positif dan ion negatif pada daerah di sekitar junction.

Divais	: bahan semikonduktor yang sudah diberikan pola tertentu untuk menghasilkan fungsi tertentu sesuai dengan yang diinginkan perancangannya.
Donor	: impuritas yang menyumbangkan sejumlah elektron pada semikonduktor.
Doping	: peristiwa penambahan bahan pengotor ke dalam semikonduktor.
Ekstrinsik	: bahan instrinsik (murni) semikonduktor yang telah dicampurkan (didoped) bahan lain (dopant).
Elektron valensi	: elektron yang menempati orbit terluar dari suatu atom.
Forward bias	: pemberian catu pada pn junction dengan kutub positif baterai dihubungkan dengan semikonduktor tipe p dan kutub negatif baterai dihubungkan dengan semikonduktor tipe n.
Generasi	: peristiwa lepasnya elektron dari ikatannya atau peristiwa terbentuknyanya pasangan elektron bebas dan hole. Kebalikan dari rekombinasi.
Hole	: suatu tempat kosong yang muncul pada atom ketika elektron berpindah ke tempat lain.
Impuritas	: bahan lain yang diberikan kepada semikonduktor intrinsik untuk mendapatkan semikonduktor tipe tertentu.
Intrinsik	: bahan semikonduktor yang memiliki tingkat kemurnian yang tinggi hanya terdiri dari satu jenis atom.
Kovalen	: ikatan antar atom dimana antara satu atom dengan atom yang lain saling menyumbang elektron
Kristal	: bahan yang memiliki keteraturan struktur yang tinggi dari atom-atom penyusunya.
Life time	: lamanya waktu terbentuknya pasangan elektron bebas dan hole hingga hilangnya pasangan hole karena proses rekombinasi
Photon	: energi dari radiasi cahaya yang terkecil

Phonon : energi yang dilepaskan ketika sebuah elektron berpindah dari pita energi tinggi ke pita energi yang lebih rendah.

Photon flux : jumlah photon persatuan luas.

Potensial barrier : potensial yang terbentuk pada persambungan pn junction karena adanya pasangan dipole.

Rekombinasi : peristiwa bersatunya elektron dan hole

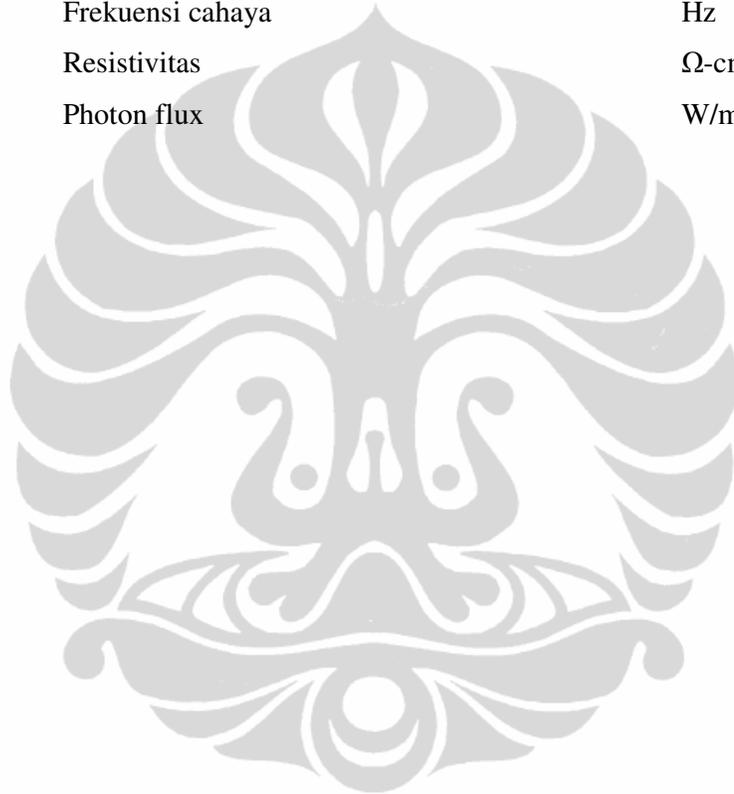
Reverse bias : pemberian catu pada pn junction dengan kutub positif baterai dihubungkan dengan semikonduktor tipe n dan kutub negatif baterai dihubungkan dengan semikonduktor tipe p.



## DAFTAR SIMBOL

Symbol	Keterangan	Satuan
$A_0$	Konstanta material semikonduktor	
$D$	Koefisien difusi	$\text{cm}^2$
$E$	Energi	eV
$E_c$	Bagian bawah conduction band	eV
$E_f$	Tingkat energi fermi	eV
$E_g$	Energi bandgap	eV
$E_v$	Bagian atas valence band	eV
$f$	Frekuensi	Hz
$G$	Generasi	
$h$	Konstanta planck	J-s
$h\nu$	Energi Photon	eV
$I$	Arus	A
$I_D$	Arus yang melewati pn junction	A
$I_S$	Arus saturasi pn junction	A
$J$	Rapat arus	$\text{A/cm}^2$
$k$	Konstanta Boltzman	J/K
$kT$	Energi termal	eV
$L$	Panjang	cm atau $\mu\text{m}$
$m_0$	Massa diam elektron	kg
$n$	Densitas elektron bebas	$\text{cm}^{-3}$
$n_i$	Densitas intrinsic	$\text{cm}^{-3}$
$N$	Konsentrasi doping	$\text{cm}^{-3}$
$N_A$	Densitas impuritas akseptor	$\text{cm}^{-3}$
$N_C$	Density of states efektif pada conduction band	$\text{cm}^{-3}$
$N_D$	Densitas impuritas donor	$\text{cm}^{-3}$
$N_V$	Density of states efektif pada valance band	$\text{cm}^{-3}$
$P$	Daya	W

$\rho$	Densitas hole bebas	$\text{cm}^{-3}$
$q$	Besar muatan listrik	C
R	Resistansi	$\Omega$
T	Temperatur	K
V	Tegangan	V
$\alpha$	Koefisien absorpsi	
$\lambda$	Panjang gelombang	$\mu\text{m}$ atau $\text{Å}$
$\nu$	Frekuensi cahaya	Hz
$\rho$	Resistivitas	$\Omega\text{-cm}$
$\Phi$	Photon flux	$\text{W/m}^2$



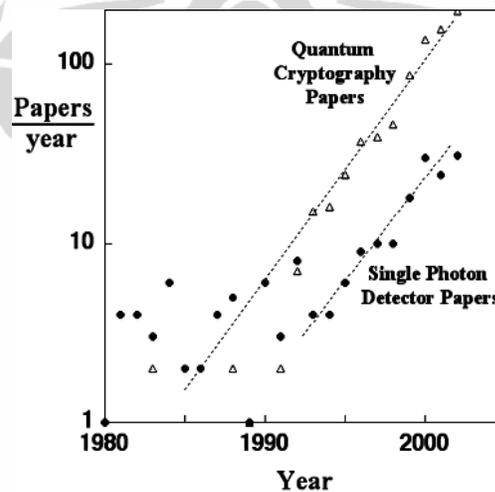
# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah dan Permasalahan

Deteksi dan pengukuran karakteristik cahaya telah terbukti bermanfaat dalam banyak bidang, seperti *astronomy*, *control systems* dan *communications*. Divais yang mempunyai sensitifitas tinggi yang mampu mendeteksi cahaya berintensitas rendah, seperti foton adalah detektor foton tunggal, foton adalah partikel dasar dalam suatu fenomena elektromagnetik [1].

Pemanfaatan detektor foton tunggal dalam *optical communication* memasuki suatu domain baru, yaitu *quantum communication*. Daerah yang paling banyak diteliti dan memberikan manfaat yang significant dalam *quantum communication* adalah *quantum cryptography*, hal ini terlihat dari meningkatnya *paper* mengenai detektor foton tunggal berbanding lurus dengan *paper* mengenai *quantum cryptography*, seperti terlihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Perbandingan antara *Quantum Cryptography Paper* dengan *Single Photon Detector Paper* [2].

Pada Tesis ini akan dirancang, disimulasikan dan dianalisa *Nanoscale-based Single Photon Avalanche Diode* dengan tujuan menghasilkan rancangan SPAD yang memiliki *timing response* dibawah 144 ps dengan cara memperkecil daerah aktif dan memperlebar daerah deplesi dengan menggunakan *heterostructure silicon nanowire* berdiameter 20 nm dan berstruktur p-i-n.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dipelajari dalam tesis ini meliputi :

- a. SPAD memiliki karakteristik yang didasari oleh suatu *pn junction* yang diberikan bias *reverse* dengan besar tegangan diatas tegangan *breakdown* agar terjadi pelebaran daerah deplesi dengan medan listrik yang tinggi, sehingga energi satu foton dapat memicu terjadinya fenomena *avalanche multiplication* yang dapat mengalirkan *photocurrent* dari anoda ke katoda.
- b. Tesis ini akan dirancang SPAD berbasis SiNW dengan struktur p-i-n berdiameter skala 20 nm yang mempunyai karakteristik pendeteksi foton tunggal.

## 1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan dari tesis ini adalah untuk merancang desain struktur SPAD berbasis SiNW dengan struktur p-i-n berdiameter skala 20 nm dengan karakteristik pendeteksi foton tunggal.

## 1.4 Batasan Masalah

Pada tesis ini penulisan difokuskan pada perancangan SPAD berbasis SiNW dengan struktur p-i-n berdiameter skala 20 nm.

## 1.5 Metodologi Penulisan

Untuk mencapai tujuan pada tesis ini, maka akan dilaksanakan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Mempelajari karakteristik dan prinsip kerja *Single Photon Avalanche Diode*.

2. Mempelajari karakteristik dari foton tunggal.
3. Mempelajari karakteristik sifat absorpsi pada silikon sebagai bahan dasar SPAD, hal ini dilakukan untuk memperoleh informasi tentang daerah panjang gelombang tempat terjadinya penyerapan intensitas cahaya yang maksimal.
4. Mempelajari karakteristik dari *Silicon Nanowire* (SiNW) yang menjadi basis dari perancangan SPAD berskala nano pada tesis ini.
5. Perancangan desain struktur SPAD berbasis SiNW dengan struktur p-i-n berdiameter skala 20 nm.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Untuk memudahkan pemahaman penulisan, tesis dibagi dalam lima bab yang disusun berdasarkan sistematika sebagai berikut: BAB 1 adalah Pendahuluan yang mencakup latar belakang penulisan tesis, tujuan penulisan, pembatasan masalah dan sistematika penulisan; BAB 2 Menguraikan karakteristik dan prinsip kerja *Single Photon Avalanche Diode* (SPAD); BAB 3 Menguraikan perancangan secara fisik yang dilakukan guna mendapatkan desain struktur SPAD berbasis SiNW dengan struktur p-i-n berdiameter skala 20 nm dan diagram alir simulasi; BAB 4 berisi tentang simulasi dan hasil simulasi BAB 5 Berisi kesimpulan dari tesis.

**BAB 2**  
**KARAKTERISTIK NANOSCALE-BASED**  
**SINGLE PHOTON AVALANCHE DIODE ON SILICON**

**2.1 Dasar Teori Semikonduktor**

Berdasarkan resistivitasnya bahan yang ada di muka bumi secara listrik dapat dibagi menjadi tiga, yaitu isolator dengan resistivitas lebih besar  $10^5 \Omega\text{-cm}$ , konduktor dengan resistivitas kurang dari  $10^{-2} \Omega\text{-cm}$  dan semikonduktor yang memiliki nilai yang memiliki nilai resistivitas di antara keduanya. Konduktor merupakan bahan secara listrik mudah mengalirkan arus, seperti besi, emas, tembaga dan kebanyakan logam lainnya. Isolator merupakan bahan yang secara listrik sulit menghantarkan arus listrik, misalnya kayu, kaca plastik dan lain-lain, sedangkan semikonduktor adalah bahan yang memiliki sifat diantara konduktor dan isolator dengan nilai resistivitas yang dapat bervariasi dibawah pengontrolan yang cermat. Nilai resistansi suatu bahan diperoleh dari Persamaan (2.1).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

sehingga nilai resistivitas didapat dari turunan Persamaan (2.1) menjadi Persamaan (2.2).

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (2.2)$$

dengan L dan A adalah panjang dan luas penampang bahan. Sedangkan resistansi R dapat diperoleh dengan mengukur arus yang mengalir melalui batang material *homogen* dengan penampang yang *uniform*, ketika tegangan V diberikan pada kedua ujung bahan. Nilai R ini didapat dengan Persamaan (2.3).

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.3)$$

**Universitas Indonesia**

Untuk memahami karakteristik fisik dari semikonduktor, terdapat dua model yang dapat digunakan yaitu : *energy-band model* dan *crystal-bonding model*.

## 2.2 Energi-band Model Semikonduktor

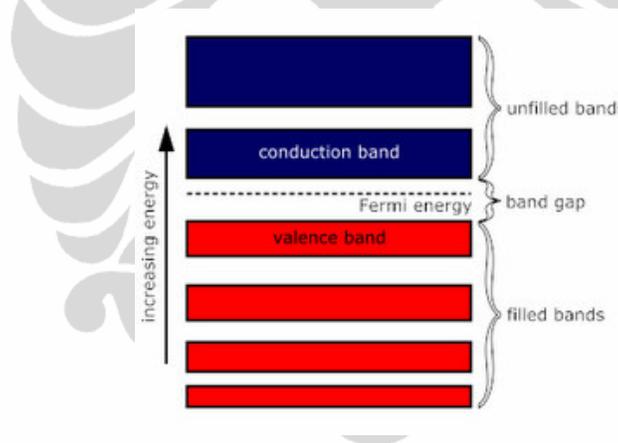
Atom merupakan bagian terkecil suatu zat yang masih memiliki sifat zat tersebut. Atom tersusun dari inti atom yang bermuatan positif dan elektron di sekitar inti atom yang bermuatan negatif. Dalam keadaan normal atom bersifat netral. Elektron yang ada di sekitar inti atom berkeliling dengan suatu jari-jari tertentu sesuai dengan tingkat energi yang dimiliki elektron. Tidak semua ruang pada atom dapat ditempati oleh elektron, hanya tempat-tempat tertentu saja yang dapat ditempati oleh elektron. Pada kenyataannya elektron dapat menempati satu dari sederet tingkat energi yang sesuai dengan tingkat energi yang dinyatakan pada Persamaan (2.4) [3].

$$E_n = \frac{Z^2 m_0 q^4}{8 \epsilon_0^2 h^2 n^2} \quad (2.4)$$

Elektron bermuatan negatif  $-q$  sehingga  $q$  pada Persamaan (2.4) menjadi positif.  $Z$  pada Persamaan (2.4) adalah nomor proton pada nukleus;  $m_0$  massa elektron bebas,  $\epsilon_0$  adalah permitivitas ruang hampa;  $h$  merupakan konstanta Planck dan  $n$  adalah bilangan bulat positif.

Jika pada atom terdapat lebih dari satu elektron, maka elektron ini akan menempati tingkat yang memiliki energi paling rendah kemudian elektron yang memiliki energi lebih tinggi akan menempati tingkat energi berikutnya begitu seterusnya. Tingkat energi ini merupakan tempat untuk elektron bergerak mengelilingi inti, seperti planet mengelilingi matahari. Garis edar elektron ini disebut dengan orbit. Tiap orbit hanya boleh ditempati oleh sejumlah elektron tertentu yang sesuai dengan tingkat energinya. Orbit yang terluar disebut dengan orbit valensi. Menurut prinsip Pauli, maksimal hanya boleh ada dua elektron, dengan *spins* yang berlawanan, yang boleh menempati sembarang tingkat energi [3]. Ketika dua buah atom didekatkan, maka masing-masing inti atom akan mempengaruhi atom yang lain. Hal ini akan menyebabkan perubahan tingkat

energi. Potensial yang menentukan tingkat energi elektron juga berubah. Sebagai akibatnya semua tingkat energi untuk elektron dimodifikasi akibat perubahan potensial ini. Sesuai dengan prinsip Pauli maka pada satu tingkat energi  $E_n$  hanya boleh ada dua buah elektron dengan spin yang berlawanan, sehingga ketika dua buah atom dibawa ke dalam suatu sistem maka pada tingkat energi  $E_n$  yang diizinkan harus dibagi menjadi dua tingkat dengan sedikit perbedaan energi. Ketika sejumlah besar atom ditambahkan untuk membentuk sebuah struktur kristal maka masing-masing atom itu akan mempengaruhi atom tetangganya. Tapi sekali lagi prinsip Pauli menyatakan bahwa satu tingkat energi  $E_n$  hanya boleh ditempati oleh dua buah elektron, sehingga jika ada  $N$  buah atom, maka tingkat energi asal  $E_n$  harus dibagi menjadi  $N$  buah tingkat energi yang berbeda, sehingga terbentuklah pita energi. Antara satu pita energi dengan pita energi yang lain dipisahkan oleh energi gap seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Pita Energi dan Band Gap [4].

Pada bahan tertentu seperti emas dan besi, antara satu pita dengan pita yang lain terjadi saling tumpang tindih sehingga elektron pada satu pita dapat berpindah ke pita yang lain dengan mudah. Pada bahan isolator energi gapnya begitu besar, sehingga hampir tidak memungkinkan terjadinya perpindahan elektron dari satu pita ke pita yang lain. Pada bahan semikonduktor energi gapnya tidak terlalu besar tetapi tidak sampai tumpang tindih.

### 2.3 Bond Model Semikonduktor

Pada pendekatan *bond-model* sebuah semikonduktor diamati dalam hal ikatan antara inti atom dengan elektronnya. Semikonduktor golongan IV seperti silikon memiliki ikatan kovalen dengan empat atom tetangga yang terdekat. Pada temperatur absolut semua elektron terikat pada inti atom, sehingga tidak ada elektron yang berpindah ketika diberikan medan listrik. Pada temperatur yang lebih tinggi, energi panas akan melepaskan ikatan beberapa elektron, sehingga elektron yang lepas dari ikatannya akan menjadi elektron bebas. Ketika elektron ini lepas dari ikatannya, maka ia akan meninggalkan tempat kosong, tempat kosong ini kemudian dikenal dengan nama *Hole*. Elektron,  $n$ , bermuatan negatif, maka *hole*,  $p$ , dianggap bermuatan positif.

### 2.4 Donor dan Aseptor pada Semikonduktor

Semua hal yang dibahas di atas berkaitan dengan semikonduktor murni yang disebut semikonduktor intrinsik, yaitu sebuah semikonduktor yang seluruh atom penyusunannya penyusunnya hanya terdiri dari satu jenis atom. Pada kondisi demikian, maka jumlah elektron pada pita konduksi sama dengan jumlah *hole* pada pita valensi. Semikonduktor intrinsik ini tidak terlalu banyak bermanfaat, tetapi semikonduktor yang memiliki perbedaan jumlah muatan positif dan negatif mempunyai nilai guna yang tinggi bagi manusia. Untuk membentuk semikonduktor yang memiliki perbedaan jumlah muatan positif dan negatif perlu ditambahkan unsur lain ke dalam semikonduktor intrinsik, sehingga akan terbentuk semikonduktor ekstrinsik yang memiliki karakteristik seperti yang kita inginkan. Bahan yang ditambahkan ke dalam semikonduktor intrinsik disebut impuritas, sedangkan peristiwa penambahan suatu bahan lain ke dalam semikonduktor disebut *doping*.

Terdapat dua tipe bahan semikonduktor ekstrinsik berdasarkan impuritasnya yaitu semikonduktor tipe- $n$  dan tipe- $p$ . Semikonduktor tipe- $n$  misalnya terketika silikon *didoping* dengan pospor. Silikon mempunyai empat elektron valensi, sedangkan pospor memiliki lima elektron valensi. Ketika atom pospor ditambahkan dengan masing-masing menyumbangkan empat buah elektron. Tetapi karena atom pospor memiliki lima buah elektron valensi maka ada satu sisa

elektron yang tidak terikat kovalen. Elektron ini terikat lemah oleh inti atom, sehingga mudah menjadi elektron bebas. Jika jumlah atom pospor yang ditambahkan semakin banyak maka terdapat sejumlah besar elektron bebas pada pita konduksi. Jumlah elektron pada pita konduksi ini jauh lebih banyak dari jumlah *hole* pada pita valensi, sehingga dalam hal ini elektron disebut sebagai pembawa mayoritas dan *hole* disebut sebagai pembawa minoritas. Pospor menyumbang sejumlah elektron pada semikonduktor, maka pospor dikenal sebagai donor. Pada semikonduktor tipe-n, dengan tambahan sedikit energi elektron akan berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Konsentrasi donor dinyatakan dengan  $N_d$ .

Pada semikonduktor tipe-p terjadi hal yang sebaliknya, yaitu jumlah *hole* pada pita valensi jauh lebih banyak dari elektron di pita konduksi. Semikonduktor tipe-p ini misalnya terjadi silikon *didoping* dengan boron yang memiliki tiga buah elektron valensi. Ketika atom boron ditambahkan pada bahan silikon maka tiap masing-masing atom akan saling berikatan kovalen. Tiap atom memiliki empat buah ikatan terhadap atom tetangganya. Jumlah elektron valensi pada boron hanya tiga buah, maka ada satu ikatan yang hanya terdiri dari satu elektron sehingga tiap atom boron menyumbangkan satu ruang kosong, *hole*. Ruang kosong ini mudah menerima elektron, maka impuritasnya disebut *acceptor* dan konsentrasi *acceptornya* dinyatakan sebagai  $N_a$ .

## 2.5 Generasi, Rekombinasi dan Life Time

Dalam Semikonduktor terdapat 4 (empat) buah jenis partikel bermuatan yang masing-masing partikel itu bermuatan  $q$ , sehingga rapat muatan dapat didefinisikan sebagaimana pada Persamaan (2.5)

$$\rho = q(p + N_d - n - N_a) \quad (2.5)$$

dengan  $p$  adalah konsentrasi *hole*  $+$ ,  $n$ ,  $q$ ,  $N_d$ , dan  $N_a$  masing-masing adalah konsentrasi elektron sebesar  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Coloumb, konsentrasi ion donor dan konsentrasi ion aseptor.

Pada semikonduktor intrinsik konsentrasi elektron dan hole selalu sama karena pembawa muatan ini, *hole* dan elektron, terbentuk dan hilang secara bersamaan yaitu ketika pecahnya ikatan kovalen dan terbentuknya kembali ikatan kovalen. Konsentrasi intrinsik ini dinyatakan sebagai  $n_i$  yang nilainya sebesar [3].

$$n_i = n = p \quad (2.6)$$

Konsentrasi elektron dan *hole* merupakan fungsi dari temperatur karena terbentuk akibat energi termal, yaitu :

- a) Pada  $T = 0^0 \text{ K}$ , maka  $n = p = 0$ ;
- b) Pada  $T > 0^0 \text{ K}$ , maka  $n = p = n_i$ ;

Semakin tinggi temperatur, maka akan semakin tinggi pula konsentrasi elektron dan hole dalam keadaan setimbang akan memenuhi Persamaan (2.7)[3] berikut :

$$n \cdot p = n_i^2 = f(T) \quad (2.7)$$

hubungan antara konsentrasi intrinsik dan temperatur dinyatakan pada Persamaan (2.8)[3].

$$n_i^2 = A_0 \cdot T^3 \cdot e^{(-E_g/k \cdot T)} \quad (2.8)$$

dengan :

- $A_0$  = konstanta material semikonduktor
- $T$  = temperatur semikonduktor dalam Kelvin
- $E_g$  = energi minimal untuk memecah ikatan kovalen
- $k$  = konstanta Boltzmann =  $1,3 \cdot 10^{-23} \text{ Watt} \cdot \text{Sec}^0 \text{ K}$

Pada semikonduktor yang homogen rapat muatannya = 0, sehingga Persamaan (2.5) akan menjadi Persamaan (2.9) [3].

$$p + N_d - n - N_a = 0 \quad (2.9)$$

Pada semikonduktor tipe-n  $N_d \gg n_i$ ,  $N_a = 0$  dan  $n \gg p$ .

sehingga Persamaan (2.9) akan menjadi Persamaan (2.10)

$$n \approx N_d \quad (2.10)$$

Dari Persamaan (2.10) dan Persamaan (2.7) dapat diperoleh Persamaan (2.11)

$$p = n_i^2 / N_d \quad (2.11)$$

Pada semikonduktor tipe-p  $N_a \gg n_i$ ,  $N_d = 0$  dan  $p \gg n$ .

Persamaan (2.9) menjadi Persamaan (2.12)

$$p \approx N_a \quad (2.12)$$

dari Persamaan (2.12) dan Persamaan (2.7) didapat Persamaan (2.13)

$$n \approx n_i^2 / N_a \quad (2.13)$$

ketika konsentrasi elektron dan *hole* bertambah, maka  $n.p > n_i^2$ .

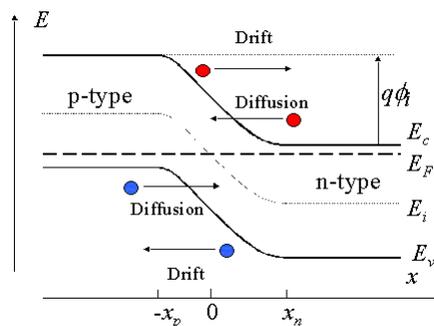
Salah satu penyebab bertambahnya konsentrasi elektron dan *hole* adalah adanya iluminasi sinar dengan panjang gelombang tertentu. Sinar dengan panjang gelombang tertentu memiliki energi yang cukup untuk memecah ikatan kovalen sehingga elektron terlepas menjadi elektron bebas dengan meninggalkan *hole*. Peristiwa terbentuknya pasangan elektron *hole* dikenal dengan istilah generasi (*Generation*). Elektron yang sudah terlepas akan bergerak bebas di pita konduksi tetapi elektron tidak dapat bertahan lama dan cenderung untuk menempati pita yang lebih rendah. Setelah beberapa saat elektron akan kembali mengisi *hole* yang ditinggalkan. Peristiwa hilangnya pasangan elektron *hole* karena elektron menempati *hole* yang ditinggalkan dikenal dengan rekombinasi (*Recombination*). Rekombinasi dapat juga disebut sebagai proses pembentukan ikatan kovalen karena kembalinya elektron memasuki *hole*. Waktu dari terbentuknya pasangan elektron *hole* sampai hilangnya pasangan elektron karena rekombinasi disebut dengan waktu hidup (*life time*). Selama waktu hidup pembawa muatan bergerak

dengan menempuh jarak tertentu, jarak yang ditempuh selama waktu hidup disebut panjang difusi (*Diffusion Length*).

## 2.6 Sifat Dasar P-N Junction

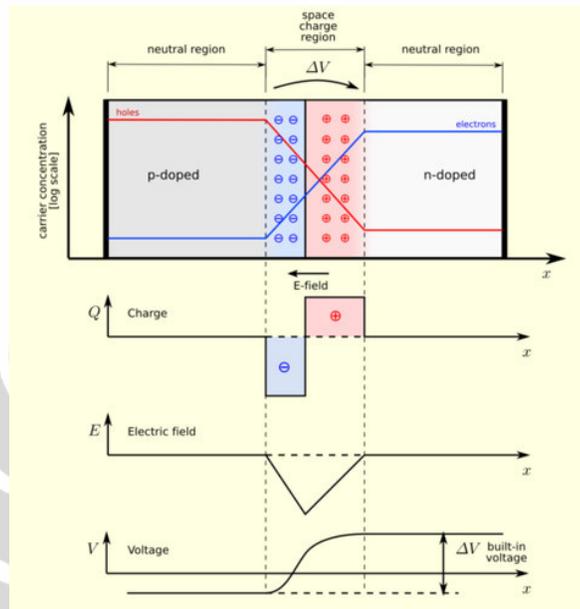
### 2.6.1 P-N Junction pada Kesetimbangan Termal

Ketika dua buah semikonduktor yang berbeda tipe disambungkan, akan terbentuk persambungan pn (*pn junction*). Tipe-p memiliki pembawa mayoritas berupa *hole*, sedangkan tipe-n pembawa mayoritasnya adalah elektron. Pada saat kedua bahan ini digabung akan terjadi gradien konsentrasi di daerah persambungan. Gradien konsentrasi ini akan *hole* berdifusi dari bahan tipe-p ke bahan tipe-n, sebaliknya elektron akan berdifusi dari bahan tipe-n ke bahan tipe-p. Elektron yang berdifusi ke daerah tipe-p akan mengalami rekombinasi dengan *hole* di tipe-p terlihat pada Gambar 2.2. Akibat difusi dan rekombinasi, maka atom yang berada di dekat persambungan pada tipe-n akan kehilangan elektron dan berubah menjadi ion positif begitu juga atom tipe-p yang berada di dekat persambungan akan menjadi ion negatif. Adanya ion positif dan ion negatif akan menyebabkan munculnya ion yang disebut pasangan *dipole*. Semakin lama semakin banyak terbentuk pasangan *dipole*, hingga akhirnya terbentuk cukup banyak pasangan *dipole* di sekitar persambungan. Sebagaimana kapasitor, pasangan *dipole* ini memiliki medan listrik yang besarnya bertambah dengan bertambahnya difusi dan rekombinasi, hingga akhirnya medan listrik akan menyebabkan *drift* elektron dari tipe-p ke tipe-n. Pada suatu saat tertentu besarnya arus *drift* dan arus difusi sama besar tetapi berlawanan arah, sehingga resultan arus elektron yang melewati persambungan sama dengan nol.



Gambar 2.2 Diagram pita energi *pn-junction* pada kesetimbangan termal [5].

Daerah yang ditempati pasangan *dipole* akan bebas dari muatan yang bergerak dan atomnya terikat dalam struktur kristal. Daerah di sekitar persambungan yang bebas dari muatan yang bergerak, disebut sebagai *Depletion Region*. Gambar 2.3 menunjukkan daerah deplesi pada *pn junction* [6].

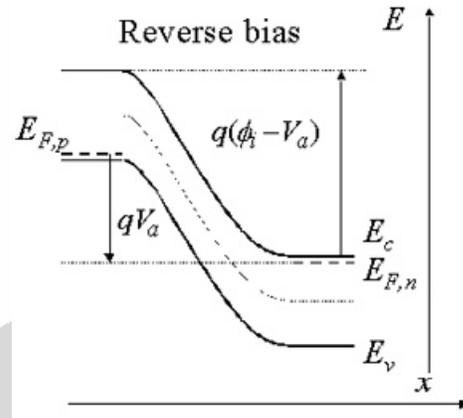


Gambar 2.3 Daerah deplesi pada *pn-junction*[6]

### 2.6.2 Reverse bias P-N Junction

Dua cara memberikan catu daya kepada *pn-junction* yaitu *forward bias* dan *reverse bias*. Disebut *forward bias* atau catu maju pada *pn-junction* diberikan tegan pada kedua ujungnya dimana kutub positif baterai dihubungkan dengan tipe-p dan kutub negatif baterai dihubungkan dengan tipe-n. *Forward bias* ini akan menyebabkan daerah deplesi menyempit karena bias ini akan mengurangi potensial *barrier*, sehingga mengganggu kesetimbangan pembawa difusi dan *drift* yang melalui persambungan. Akibat pengurangan potensial pada persambungan ini membuat hole dapat berdifusi dari tipe-p ke tipe-n begitu juga elektron akan berdifusi dari tipe-n ke tipe-p. Cara pembiasaan yang kedua, yaitu *reverse bias*. *Reverse bias* dilakukan dengan cara menghubungkan terminal positif baterai dengan sisi tipe-n dan terminal negatif baterai dihubungkan dengan sisi tipe-p. Cara pencatuan semacam ini akan menaikkan *potensial barrier* dan akibatnya

akan mengurangi aliran pembawa mayoritas. Ini diilustrasikan dalam diagram pita energi (Gambar 2.4).



Gambar 2.4 Diagram pita energi reverse-bias pada *pn-junction* [5].

Akan tetapi sejumlah kecil arus yang disebabkan pembawa minoritas tetap hadir tanpa terpengaruh *potensial barrier*. Arus ini dikenal dengan nama arus saturasi ( $I_s$ ) yang milainya sangat kecil dan tidak tergantung dari tegangan bias. Arus saturasi ini pada *photodiode* dikenal sebagai *Dark Current*. Jika tegangan *reverse bias* terus diperbesar maka *pn-junction* akan mengalami harga kritis. Catu tegangan yang lebih besar dari tegangan kritis akan menyebabkan arus terus membesar dan tidak dapat dikontrol oleh tegangan catu.

W. Shockley telah memberikan analisis secara teori tentang karakteristik arus dan tegangan sebuah dioda yang dinyatakan dalam Persamaan (2.14) [3].

$$I_D = I_s(e^{qV/kT} - 1) \quad (2.14)$$

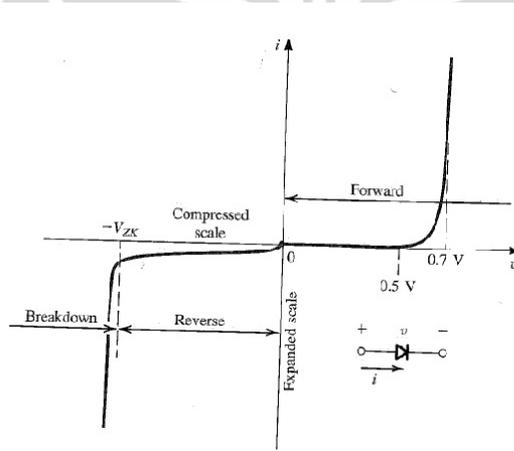
dengan :

- $I_D$  = arus yang lewat pada *pn junction*
- $V$  = tegangan yang diberikan pada *pn junction*
- $q$  = muatan elektron
- $k$  = konstanta Boltzmann
- $T$  = temperatur dalam Kelvin
- $I_s$  = arus saturasi pada *pn junction*

Dengan membuat  $\frac{k.T}{q} = V_T$  maka Persamaan (2.14) akan menjadi Persamaan (2.15).

$$I_D = I_s(e^{V/V_T} - 1) \quad (2.15)$$

dengan  $V_T$  merupakan *Voltage Temperature* dimana untuk suhu kamar,  $T = 293^0$  K,  $V_T$  bernilai 25 mV.  $I_D$  bernilai positif, jika dalam semikonduktor  $I_D$  mengalir dari tipe-p ke tipe-n. Gambar 2.5 menunjukkan kurva karakteristik volt-ampere dioda.



Gambar 2.5 Kurva karakteristik volt-ampere dioda [7].

Untuk forward bias dan  $V_D$  beberapa kali lebih besar dari  $V_T$  menjadikan Persamaan (2.14) menjadi Persamaan (2.16) [3].

$$I_D = I_s e^{qV/kT} \quad (2.16)$$

Untuk reverse bias nilai  $e^{qV/kT} \cong 0$  sehingga Persamaan (2.16) menjadi Persamaan (2.17) [3].

$$I_D = I_s \quad (2.17)$$

## 2.7 Mekanisme Breakdown pada P-N Junction

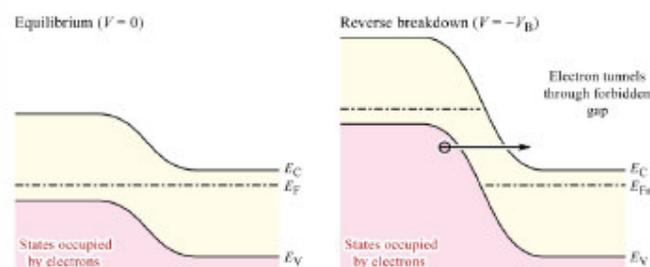
Kekuatan medan listrik di daerah deplesi meningkat dengan peningkatan tegangan reverse bias yang diberikan. Ada titik kritis pada medan listrik tinggi untuk menimbulkan kerusakan pada *pn junction* dan arus mulai mengalir. Mekanisme fisik yang terjadi dan menimbulkan kerusakan pada *pn junction* yaitu ketidakstabilan suhu, *zener breakdown (tunneling)*, dan *avalanche breakdown*.

### 2.7.1 Ketidakstabilan Suhu

Temperatur berpengaruh terhadap karakteristik *pn-junction*, yaitu untuk tegangan yang sama semakin tinggi temperatur akan menyebabkan arus dioda menjadi semakin besar. Pengaruh temperatur ini akan lebih terlihat pada dioda yang di-*reverse bias* [7].

### 2.7.2 Zener Breakdown (Tunneling)

Mekanisme *tunneling* melalui celah pita energi biasa terjadi pada *pn junction* sangat doped. Hal ini terjadi karena perbedaan energi potensial yang sangat tinggi pada *pn junction*, sehingga sebuah elektron energi kinetik yang lebih rendah dari energi potensial barrier dapat melewati *forbiden gap*, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6.



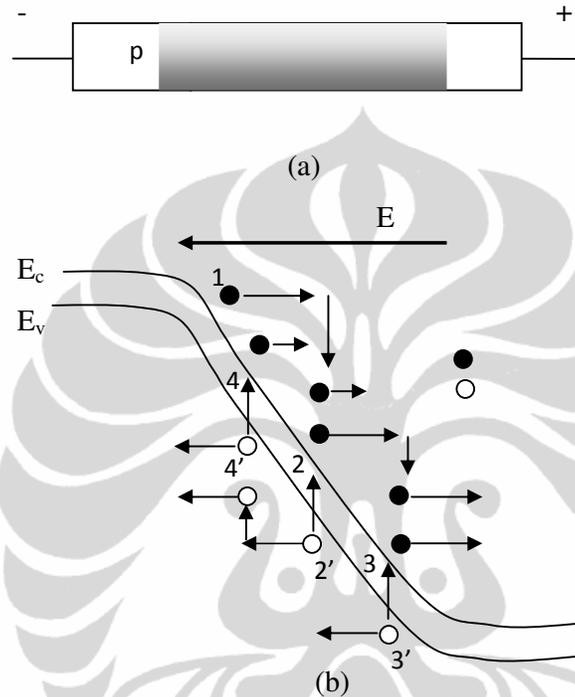
Gambar 2.6 Zener Breakdown (Tunneling) [9].

### 2.7.3 Avalanche Breakdown (ionisasi dampak)

Medan listrik yang diperlukan agar terjadi *impact ionisasi* dan *avalanche breakdown* pada *pn junction* dalam interval  $3 \cdot 10^3$  s/d  $10^5$  V/cm (bergantung pada

konsentrasi dopingnya) dengan lebar daerah deplesi sambungan tersebut lebih besar dari  $100 \text{ \AA}$  ( $0,01 \text{ \mu m}$ ) [7].

Fenomena *impact ionization* dan *avalanche multiplication* diilustrasikan melalui Gambar 2.7.b [7]. Gambar 2.7 a menunjukkan *pn junction* dengan konsentrasi doping (untuk tipe n)  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  keadaan *reverse bias*.



Gambar 2.7. Fenomena *impact ionization* dan proses *avalanche multiplication*.  
 a. *Pn junction* dalam keadaan *reverse bias*.  
 b. Diagram pita energi *avalanche breakdown* [7].

Medan listrik pada Gambar 2.7.b dalam interval  $3 \cdot 10^5$  s/d  $10^5 \text{ V/cm}$ , sehingga elektron (nomor 1) akan mendapatkan percepatan yang cukup besar dan menghasilkan energi kinetik cukup besar (mendapatkan tambahan energi kinetik).

Bila elektron yang mempunyai energi kinetik besar tersebut membentuk elektron valensi, maka elektron valensi tersebut mendapatkan energi kinetik yang cukup besar. Dengan adanya energi kinetik yang cukup besar akan mengakibatkan ikatan valensi elektron valensi tersebut tidak dapat dipertahankan, sehingga tingkat elektronnya dinaikkan dari jalur valensi ke jalur konduksi. Hal ini berarti, satu benturan elektron yang dipercepat menghasilkan sebuah pasangan elektron-

*hole* (2-2'). Fenomena ini disebut *impact ionization*, yaitu ionisasi yang diakibatkan oleh benturan.

Elektron yang baru dihasilkan tersebut, mendapat percepatan yang besar dari medan listrik, sehingga menghasilkan energi kinetik yang besar dan membentur elektron valensi. Akibat benturan tersebut, elektron valensi akan mendapatkan energi kinetik yang cukup besar untuk mematahkan ikatan kovalennya, sehingga menghasilkan pasangan elektron-*hole* lainnya (3-3'). Demikian juga dengan *hole* yang baru dihasilkan tersebut juga akan mematahkan ikatan kovalen, sehingga menghasilkan pasangan elektron-*hole* yang lain (4-4'). Proses ini terus berlanjut, menghasilkan elektron-*hole* yang lain, sehingga memperbanyak pembawa muatan bebas, menghasilkan kenaikan arus secara cepat. Fenomena ini sering disebut *avalanche* atau juga disebut *cumulative ionization* atau *avalanche multiplication*.

Untuk lebih memahami fenomena *impact ionization* akan disampaikan beberapa persamaan yang terkait dengan hal tersebut. Pada Gambar 2.7, elektron nomor 1 bergerak dengan cepat sehingga mempunyai energi kinetik serta momentum seperti ditunjukkan pada Persamaan (2.18) dan Persamaan (2.19) [9].

$$E_{kl} = \frac{1}{2} m_I v_s^2 \quad (2.18)$$

$$p_I = m_I v_s \quad (2.19)$$

Setelah tumbukan menghasilkan pasangan elektron-*hole* (2-2'). Ini berarti terdapat tiga pembawa muatan (dua elektron dan satu *hole*). Jika diasumsikan/dianggap bahwa ke tiga pembawa muatan tersebut massa efektifnya sama, energi kinetiknya serta momentumnya juga sama, maka energi kinetik total serta momentum totalnya akan mengikuti Persamaan (2.20) dan Persamaan(2.21).

$$E_{TOT} = \frac{3}{2} m_I v_f^2 \quad (2.20)$$

$$p_{TOT} = 3m_I v_f \quad (2.21)$$

Sesuai hukum kekekalan energi dan hukum kekekalan momentum, maka hubungan antara energi kinetik serta momentum sebelum dan sesudah tumbukan akan mengikuti Persamaan (2.22) dan Persamaan (2.23).

$$\frac{1}{2} m_I v_s^2 = E_g + \frac{3}{2} m_I v_f^2 \quad (2.22)$$

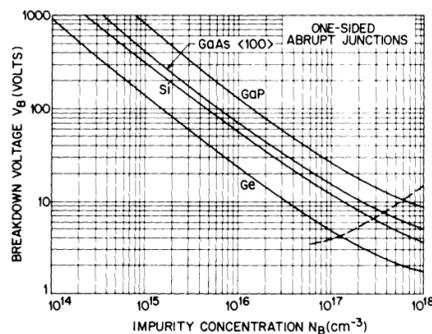
$$m_I v_s = 3m_I v_f \quad (2.23)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (2.23) ke Persamaan (2.22) dan Persamaan (2.18), maka diperoleh hubungan antara energi kinetik sebelum tumbukan dan energi gap seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2.24).

$$E_{kl} = \frac{3}{2} E_g \quad (2.24)$$

Persamaan (2.18) menunjukkan bahwa proses ionisasi akan terjadi apabila diberikan energi yang lebih besar dari energi gapnya. Pada kondisi nyata, energi tersebut bergantung pada struktur *band*-nya. Dari penelitian nilai  $E_{kl}$  pada silikon sebesar 3,6 eV (3,2  $E_g$ ) untuk elektron dan 5,0 eV (4,4  $E_g$ ) untuk *hole* [9].

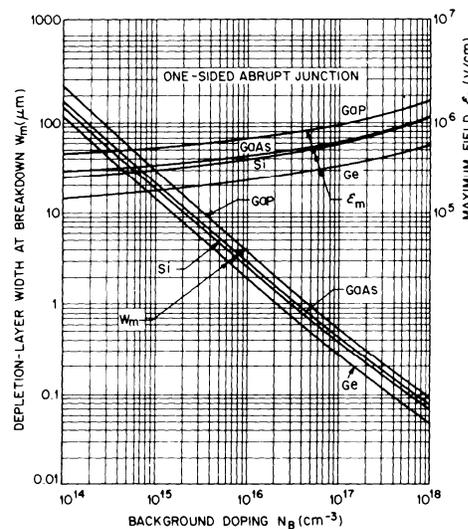
*Avalanche multiplication* akan mengakibatkan *breakdown* disebut juga sebagai *avalanche breakdown*. Gambar 2.8 menunjukkan grafik antara tegangan *breakdown* terhadap konsentrasi ketidakmurnian.



Gambar 2.8 Tegangan *breakdown* terhadap konsentrasi ketidakmurnian tipe n pada *pn junction* [9].

Gambar 2.9 menunjukkan lebar daerah deplesi dan medan listrik maksimum pada *breakdown* terhadap konsentrasi doping. Dibawah garis putus-putus pada

Gambar 2.9 tersebut, menunjukkan bahwa tegangan *breakdown* sudah didominasi oleh mekanisme *tunnelling*. Mekanisme *breakdown* untuk bahan silikon dengan tegangan *breakdown* kurang dari  $4E_g/q$  (~5 Volt untuk silikon) diakibatkan adanya efek *tunneling*. Sedangkan *breakdown* yang diakibatkan *avalanche multiplication* membutuhkan tegangan *breakdown* lebih besar  $6E_g/q$  (~8 Volt untuk silikon). Mekanisme *breakdown* dengan tegangan antara  $4E_g/q$  sampai  $6E_g/q$  disebabkan oleh *avalanche multiplication* dan *tunneling* [9].



Gambar 2.9. Lebar daerah deplesi dan medan listrik maksimum pada *breakdown* terhadap konsentrasi ketidakmurnian tipe n pada *pn junction*[9].

## 2.8 Prinsip Kerja Single Photon Avalanche Diode

Prinsip kerja dari SPAD didasari oleh prinsip sambungan semikonduktor tipe p dan n. Untuk mendeteksi foton, *pn junction* diberikan bias *reverse* agar lebih sensitif terhadap cahaya. *Single Photon Avalanche Diode* (SPAD) merupakan *Geiger Mode Avalanche Photodiode* (GM-APD), istilah "Geiger-mode" berasal dari Geiger counter yang mengukur radiasi pengion, seperti radiasi nuklir.

Ketika *pn junction* diberikan bias *reverse* dengan tegangan diatas tegangan *breakdown*. Pada bias ini medan listrik lebih tinggi dari  $3 \times 10^5$  V/cm yang dapat menyebabkan sebuah *single charge carrier* dapat memicu suatu *self-sustaining avalanche*. Arus akan meningkat sangat cepat dalam waktu *sub-nanosecond* ke tingkat makroskopik yang lebih stabil, di kisaran milliamper. Jika *single charge*

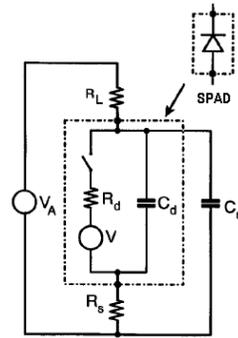
*carrier* adalah dihasilkan dari foton, pulsa *avalanche* akan terbentuk dengan jitter dalam *picosecond* dari waktu kedatangan foton terdeteksi. Peningkatan arus berlanjut sampai *avalanche* dipadamkan dengan menurunkan tegangan bias dibawah atau sama dengan tegangan *breakdown*. Medan listrik akan menurun dan tidak lagi mampu mempercepat *carrier* untuk membentuk *impact ionization* dengan *lattice* atom, sehingga arus berhenti mengalir. Untuk dapat mendeteksi foton tunggal lainnya, tegangan bias harus dinaikkan lagi di atas tegangan *breakdown*.

Prinsip kerja SPAD membutuhkan rangkaian *quenching* yang mempunyai kemampuan untuk :

1. Mendeteksi adanya arus yang disebabkan *avalanche*.
2. Menghasilkan pulsa *output* standar yang dapat mensinkronisasikan laju *avalanche*.
3. Dapat *quench* laju *avalanche* dengan menurunkan tegangan bias dibawah tegangan *breakdown*.
4. Mengembalikan photodiode ke kondisi awal.

### 2.8.1 Pasive Quenching

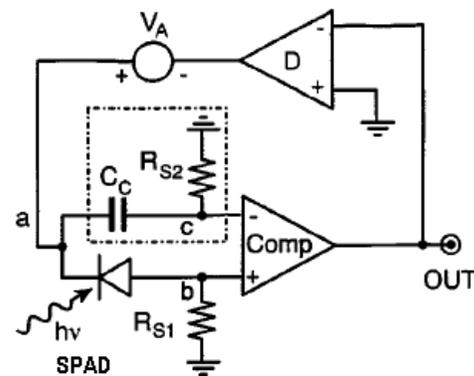
Rangkaian *quenching* yang paling sederhana adalah *Passive Quenching Circuit* dan terdiri dari sebuah resistor tunggal yang di pasang secara seri terhadap SPAD seperti yang terdapat pada Gambar 2.10. Eksperimen ini telah digunakan sejak studi awal *avalanche breakdown* pada *pn junction*. Arus *avalanche* akan mengalami *self-quenches* secara sederhana dengan meningkatkan tegangan drop pada hambatan beban  $R_L$  100 k $\Omega$  atau lebih. Setelah itu *quenching* dari arus *avalanche* menurunkan tegangan bias sampai pada tegangan *breakdown* dan SPAD siap untuk mendeteksi foton tunggal kembali [10].



Gambar 2.10. Model sirkuit untuk *pasive quenching* SPAD [10].

### 2.8.2 Active Quenching

Rangkaian *quenching* yang mampu mendeteksi pulsa *avalanche* lebih awal dengan memanfaatkan sebuah resistor  $50\ \Omega$  dan menyediakan pulsa keluaran digital dengan memanfaatkan CMOS, TTL, ECL atau NIM seperti yang terlihat pada Gambar 2.11, dapat mensinkronisasi dengan waktu kedatangan foton. Dan kemudian dengan cepat mengurangi tegangan bias ke bawah tegangan *breakdown* dan relatif cepat kembali menaikkan tegangan bias ke atas tegangan *breakdown* untuk foton berikutnya [10].



Gambar 2.11. Konfigurasi *Active Quenching Circuit* SPAD [10].

## 2.9 Karakteristik Foton Tunggal

Foton sering dinyatakan sebagai gelombang dengan lambang  $\lambda$  yang secara ekivalen dapat juga dinyatakan sebagai energi dengan lambang  $E$ . Terdapat

hubungan terbalik antara panjang gelombang ( $\lambda$ ) dengan energi ( $E$ ) yang dinyatakan dalam Persamaan (2.23).

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.23)$$

$h$  adalah konstanta Planck dan  $c$  adalah kecepatan cahaya.

Dalam konteks pembahasan partikel, satuan energi yang lebih umum digunakan adalah *electron volt* (eV) bukan Joule (J). Satu *electron volt* adalah energi yang diperlukan untuk menaikkan elektron melalui 1 volt, sehingga  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Untuk mengkonversi antar energi dalam *electron volt* dan Joule, energi dalam eV dikalikan dengan muatan  $q$  seperti ditunjukkan pada Persamaan (2.24).

$$E(\text{Joules}) = q \times E(\text{eV}) \quad (2.24)$$

Persamaan lain yang mengkaitkan langsung hubungan antara energi dalam *electron volt* dan panjang gelombang ( $\lambda$ ) diperlihatkan pada Persamaan (2.25).

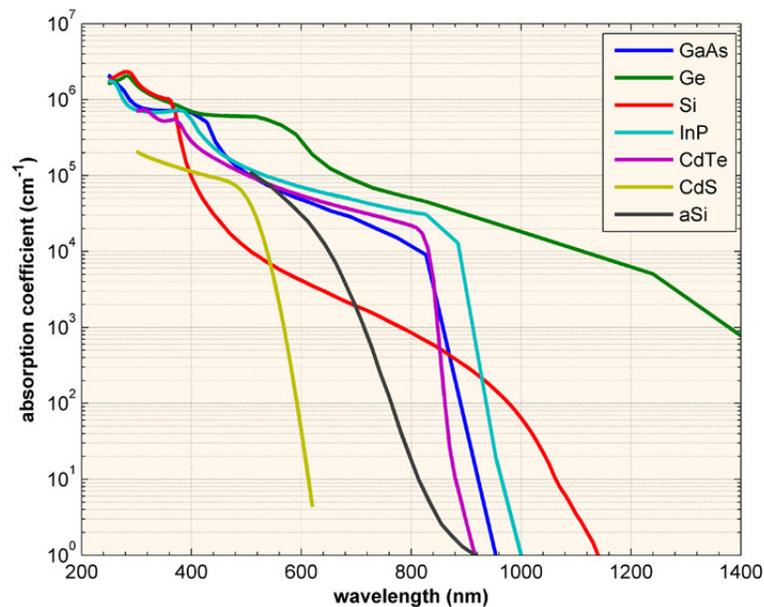
$$E(\text{eV}) = \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (2.25)$$

Dilihat dari segi penyerapan suatu bahan terhadap foton, setiap bahan memiliki daya serap yang berbeda-beda terhadap gelombang elektromagnetik yang mengenainya. Bahan silikon mempunyai tingkat penyerapan foton yang berbeda dengan germanium, galium arsenide dan bahan semikonduktor lainnya. Tingkat penyerapan satu bahan juga dipengaruhi oleh panjang gelombang foton yang diserap. Silikon akan menyerap secara berbeda antara foton yang memiliki panjang gelombang yang satu dengan yang lain. Gambar 2.12 menunjukkan karakteristik penyerapan beberapa bahan semikonduktor terhadap suatu rentang cahaya.

Gambar 2.12 juga memperlihatkan bahwa untuk setiap panjang gelombang, koefisien absorpsinya tidaklah konstan tetapi tergantung dengan panjang gelombangnya. Suatu foton yang memiliki energi sangat dekat dengan energi

**Universitas Indonesia**

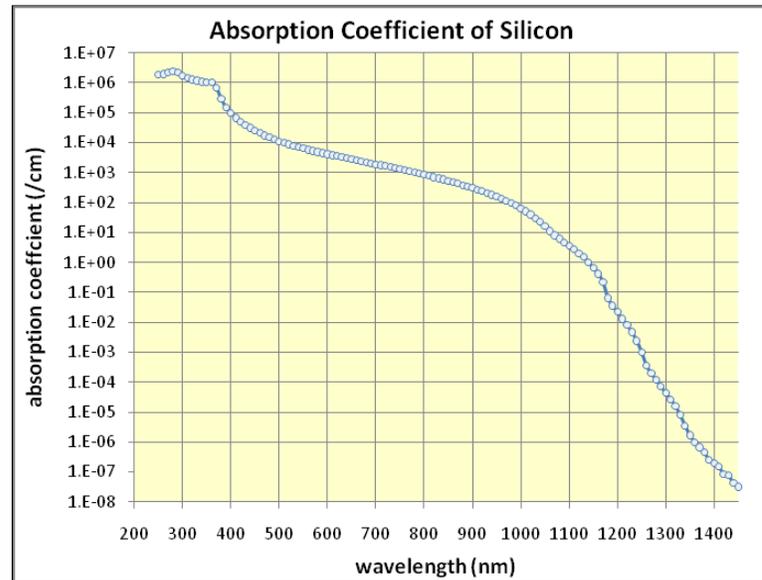
*bandgap* akan mengalami tingkat penyerapan yang lebih rendah dibandingkan dengan foton yang memiliki energi lebih tinggi dari energi *bandgap*. Hal ini terjadi karena elektron yang berada pada pita valensi berinteraksi dengan foton, sementara foton yang memiliki energi lebih tinggi dari *bandgap* akan berinteraksi dengan lebih banyak elektron. Pada aplikasi *Photodiode*, energi foton yang lebih besar dari energi *bandgap* akan muncul efek panas karena sisa energi dari elektron yang turun ke pita konduksi.



Gambar 2.12. Koefisien absorpsi,  $\alpha$ , pada beberapa bahan semikonduktor pada temperatur  $300^\circ\text{K}$  sebagai fungsi panjang gelombang cahaya [11].

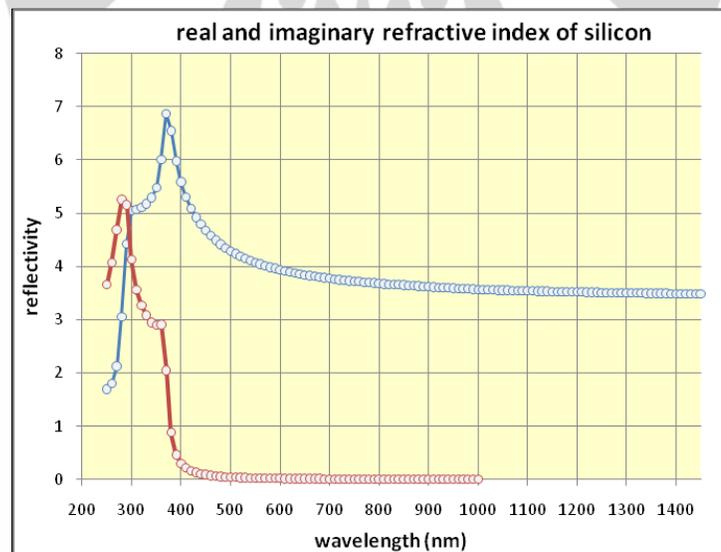
## 2.10 Karakteristik Bahan Silikon

Bahan yang digunakan dalam perancangan SPAD pada tesis ini adalah kristalin silikon dalam bentuk *Silicon Nanowire* (SiNW). Ini berarti bahwa semua karakteristik foton tunggal akan dikaitkan dengan karakteristik silikon. Bahan silikon memiliki karakteristik optik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.13.



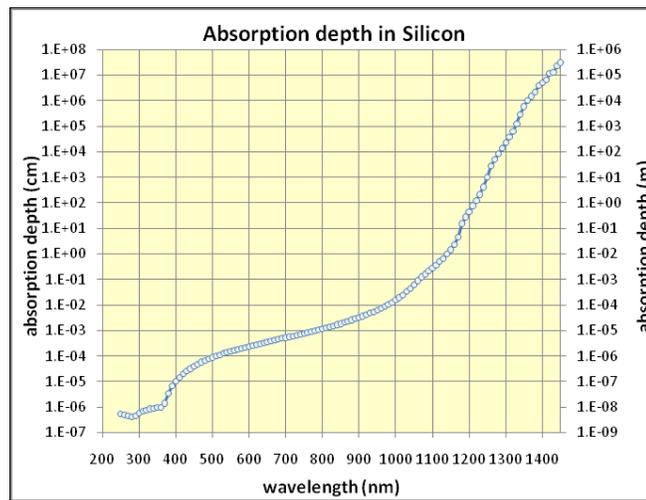
Gambar 2.13. Koefisien absorpsi Silikon pada temperatur 300 K [11].

Indeks bias silikon terhadap suatu panjang gelombang diperlihatkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Indeks bias silikon sebagai fungsi panjang gelombang [11].

Grafik tingkat kedalaman penyerapan silikon diperlihatkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Tingkat kedalaman penyerapan silikon sebagai fungsi panjang gelombang [11].

Besarnya arus yang akan dihasilkan oleh SPAD ditentukan oleh jumlah pasangan elektron-hole yang dihasilkan energi *photon*. Dengan mengabaikan efek pemantulan, jumlah cahaya yang diserap suatu bahan bergantung pada koefisien absorpsi bahan,  $\alpha$ , dan ketebalan bahan. Intensitas cahaya pada sembarang tempat suatu bahan dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.26) [11].

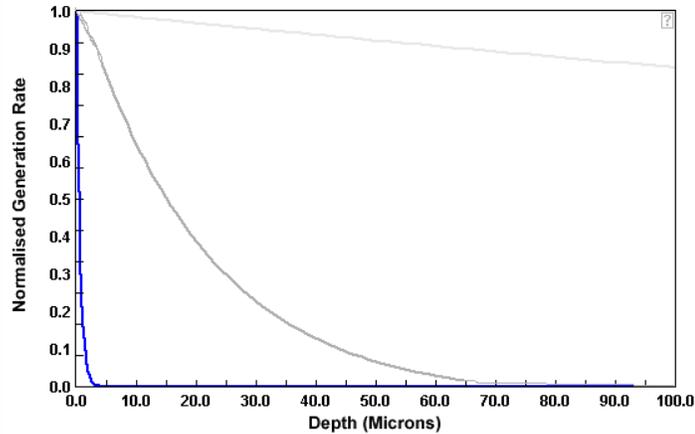
$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.26)$$

$\alpha$  adalah koefisien absorpsi,  $I_0$  adalah intensitas cahaya pada permukaan bahan dan  $x$  adalah kedalaman dimana intensitas dihitung.

Persamaan (2.26) dapat digunakan untuk menentukan jumlah pasangan elektron-hole yang terbentuk. Dengan mengasumsikan bahwa hilangnya intensitas cahaya secara langsung menjadi pasangan elektron-hole, maka generasi,  $G$ , pada suatu lapisan bahan dapat diperoleh dengan menghitung perubahan intensitas cahaya pada lapisan tersebut. Dengan menurunkan Persamaan (2.26) akan kita peroleh persamaan untuk menghitung generasi seperti ditunjukkan pada Persamaan (2.27) [11].

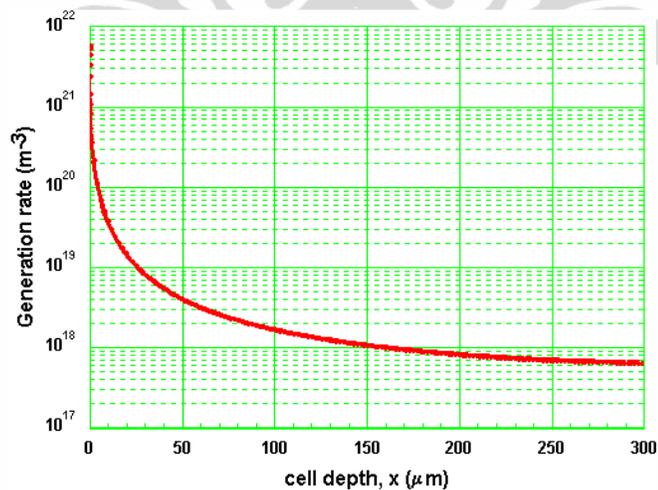
$$G = \alpha N_0 e^{-\alpha x} \quad (2.27)$$

Dimana  $N_0$  adalah *photon flux* pada permukaan per luas area per satuan waktu. Dari Persamaan (2.27) dapat terlihat bahwa tingkat generasi yang paling tinggi adalah permukaan. Hal ini dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Tingkat generasi pada silikon terhadap beberapa panjang gelombang [11].

Tingkat generasi bahan silikon terhadap standar spektrum cahaya matahari dapat dilihat pada Gambar 2.17.

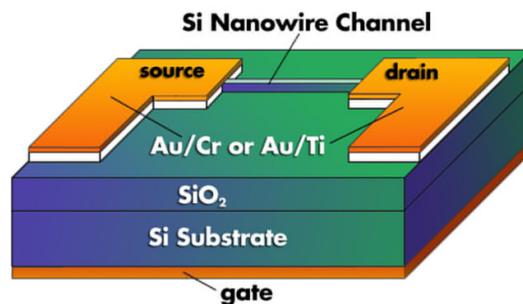


Gambar 2.17. Laju generasi sebagai fungsi kedalaman sel [11].

Gambar 2.17 memperlihatkan tingkat generasi paling tinggi terjadi pada permukaan dimana *single photon* mengalami penyerapan.

### 2.11 Karakteristik Silicon Nanowire

Perancangan pada seminar ini berbasis *Silicon Nanowire* (SiNW) seperti yang terlihat pada Gambar 2.18 merupakan salah satu *nanowire* semikonduktor yang memiliki karakteristik berbeda dibandingkan dengan karakteristik material silikon konvensional.



Gambar 2.18. Struktur SiNW transistor [12].

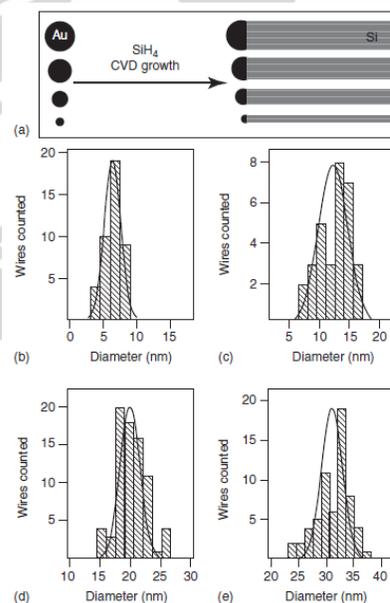
Dengan struktur yang diperkecil dan struktur kristal yang homogen, SiNW dapat menjadi basis bagi devais nano elektronik yang lebih cepat. Semikonduktor *nanowire* telah menarik perhatian para peneliti, khususnya dalam bidang sains dan teknologi. Hal ini karena terbukanya kemungkinan untuk mereduksi dimensi divais sehingga berpeluang untuk memperbanyak jumlah transistor dalam suatu *Integrated Circuit* (IC). SiNW dapat bersifat sebagai bahan semikonduktor yang memiliki sedikit sifat logam, sehingga bahan ini diduga memiliki berbagai macam sifat elektronik seperti sifat elektronik yang terdapat pada *Carbon Nanotube* [12]. Dengan demikian SiNW memiliki prospek untuk memperpanjang dominasi teknologi silikon dalam dunia mikroelektronik dan nanoelektronik.

Penumbuhan SiNW dapat dilakukan melalui pendekatan *bottom up* dan *top down*. Pendekatan *bottom up* biasanya dilakukan melalui proses penumbuhan berkatalis menggunakan metoda yang berbasis *Chemical Vapor Deposition* (CVD) atau menggunakan mekanisme *Vapor-Liquid-Solid* (VLS), sedangkan

pendekatan *top down* biasanya dilakukan dengan cara mereduksi material *bulk* menjadi *nanowire* dengan teknik tertentu.

Secara garis besar mekanisme penumbuhan SiNW melalui proses penumbuhan berkatalis terbagi menjadi tiga tahap, yaitu tahap *nukleasi*, tahap pengendapan dan tahap deposisi. Tahap nukleasi merupakan tahap pembentukan partikel (butiran) metal berukuran nanometer. Nanopartikel metal sebagai katalis memegang peranan penting dalam pembentukan *wire* pada tahap pengendapan dan deposisi.

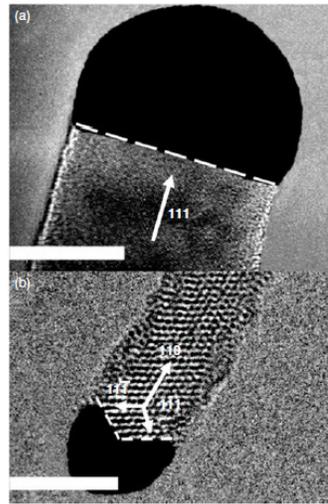
Emas (Au) dipilih sebagai katalis karena sifat fisika dan kimianya dalam penumbuhan SiNW, Au merupakan logam yang aktif secara fisika, tetapi pasif secara kimia. Gambar 2.19 mengilustrasikan cara mengendalikan ukuran SiNW dengan mengatur ukuran *nanoclusters* Au dan beberapa histogram diameter SiNW yang tumbuh dari 5, 10, 20 dan 30 nm diameter Au *nanoclusters*.



Gambar 2.19(a) Skema ilustrasi pengendalian ukuran SiNW dari *nanoclusters* Au.  
(b) Histogram diameter SiNW yang tumbuh dari *nanoclusters* Au berdiameter 5, 10, 20 dan 30 nm [13].

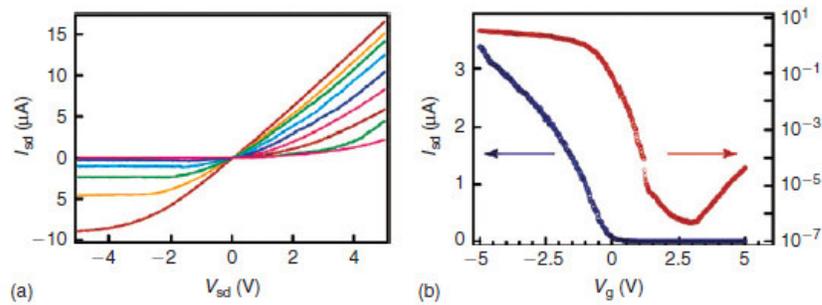
Karakteristik struktur dari *single crystalline* SiNW bergantung pada diameter SiNW seperti yang terlihat pada Gambar 2.20 Diameter antara 3 dan 10 nm 95% dari SiNWs ditemukan tumbuh sepanjang arah  $\langle 110 \rangle$ , diameter antara

10 dan 20 nm 61% dari SiNWs tumbuh sepanjang arah  $\langle 112 \rangle$  dan untuk diameter antara 20 dan 30 nm, 64% dari SiNWs tumbuh sepanjang arah  $\langle 111 \rangle$  [13].

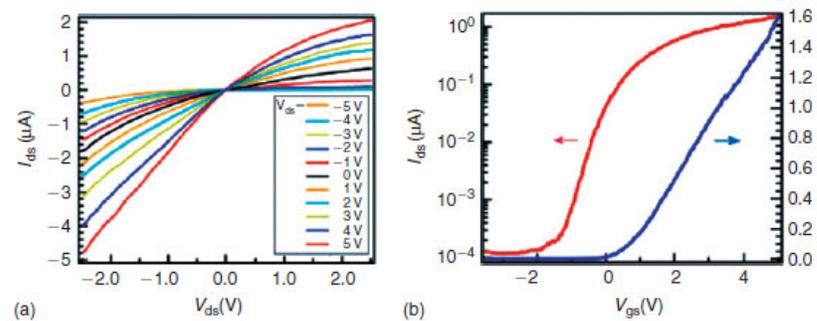


Gambar 2.20. Karakteristik *single crystalline* SiNW [13].

Karakteristik I-V dari SiNW tipe-n dan SiNW tipe-p terlihat pada Gambar 2.21 dan Gambar 2.22.



Gambar 2.21. Karakteristik I-V p-SiNW [13].



Gambar 2.22. Karakteristik I-V n-SiNW [13].

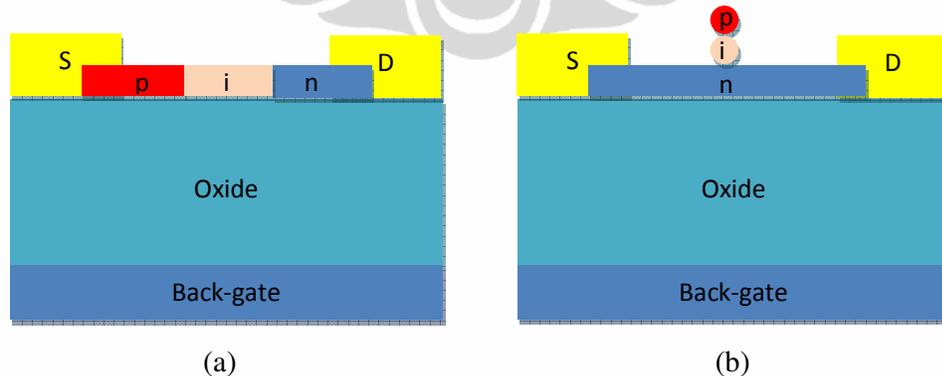
**BAB 3**  
**PERANCANGAN NANOSCALE-BASED**  
**SINGLE PHOTON AVALANCHE DIODE**

Pada bab ini akan dirancang suatu *nanoscale-based single photon avalanche diode* berbasis silikon nanowire dengan struktur p-i-n, perancangan dibagi dalam dua subbab yaitu perancangan fisik dan simulasi numerik divais *nanoscale-based single photon avalanche diode* dengan menggunakan beberapa parameter dan metode simulasi.

**3.1 Perancangan *Nanoscale-based Single Photon Avalanche Diode***

Struktur *nanoscale-based single photon avalanche diode* yang dirancang pada tesis ini menggunakan struktur p-i-n dengan tujuan memperlebar daerah deplesi pada daerah instrintik semikonduktor tempat terjadi *avalanche multiplication* yang menjadi dasar operasional SPAD.

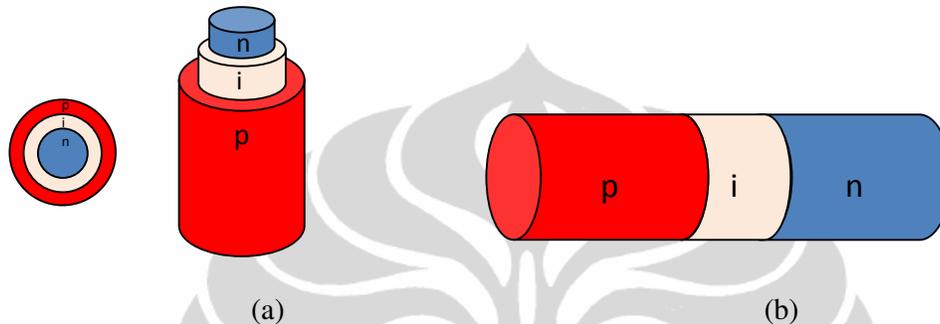
Perancangan desain struktur p-i-n SiNW dapat dilakukan dengan dua alternatif struktur SiNW, yaitu dengan pembentukan struktur p-i-n pada SiNW *heterostructure* atau dengan penggabungan dari tiga buah SiNW seperti yang terlihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Struktur p-i-n SiNW (a) Struktur p-i-n SiNW *heterostructure*  
(b) Struktur p-i-n dengan 3 SiNW

Pada tesis ini dirancang struktur p-i-n SiNW *heterostructure* dikarenakan SiNW *heterostructure* lebih mudah diaplikasikan dalam bentuk *array* dalam suatu *Integrated Circuit (IC)*.

Berdasarkan struktur bentuk geometri selnya SiNW *heterostructure* dibagi atas dua jenis yaitu *core shell and core multishell* dan *nanowire superlattice*, seperti yang terlihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Struktur p-i-n SiNW *heterostructure*  
(a) *core shell and core multishell* (b) *nanowire superlattice*

Struktur SiNW *heterostructure* yang dipakai pada tesis ini adalah struktur *nanowire superlattice* yang ditumbuhkan dari *nanoclusters* Au berdiameter 20 nm untuk memperoleh *single crystalline* sepanjang  $\langle 111 \rangle$  sesuai dengan karakteristik SiNW yang akan berpengaruh pada kinerja dari SPAD.

Penumbuhan SiNW ini menggunakan pendekatan *bottom up* dilakukan melalui proses penumbuhan berkatalis menggunakan metoda yang berbasis *Chemical Vapor Deposition (CVD)*, dilakukan dalam 3 tahap penumbuhan yaitu

1. Tahap pertama menumbuhkan *p-type* SiNW.

Tahap ini dimulai dengan menumbuhkan SiNW hingga mencapai ukuran *p-type* SiNW yang diinginkan selanjutnya penumbuhan akan dihentikan dengan memberikan gas  $H_2$  pada proses CVD dan kemudian memberikan dopant boron pada SiNW sesuai dengan konsentrasi yang diinginkan.

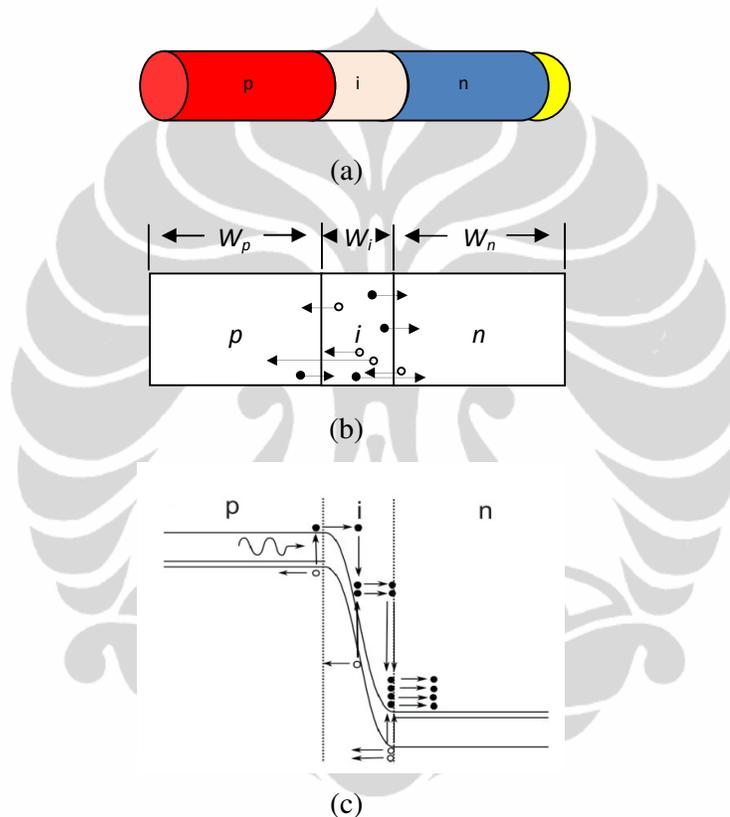
2. Tahap kedua menumbuhkan *i-type* SiNW.

Penumbuhan SiNW dilanjutkan dengan mengurangi gas  $H_2$  pada proses CVD hingga mencapai ukuran *i-type* SiNW yang diinginkan tanpa memberikan dopant.

3. Tahap ketiga menumbuhkan *n-type* SiNW

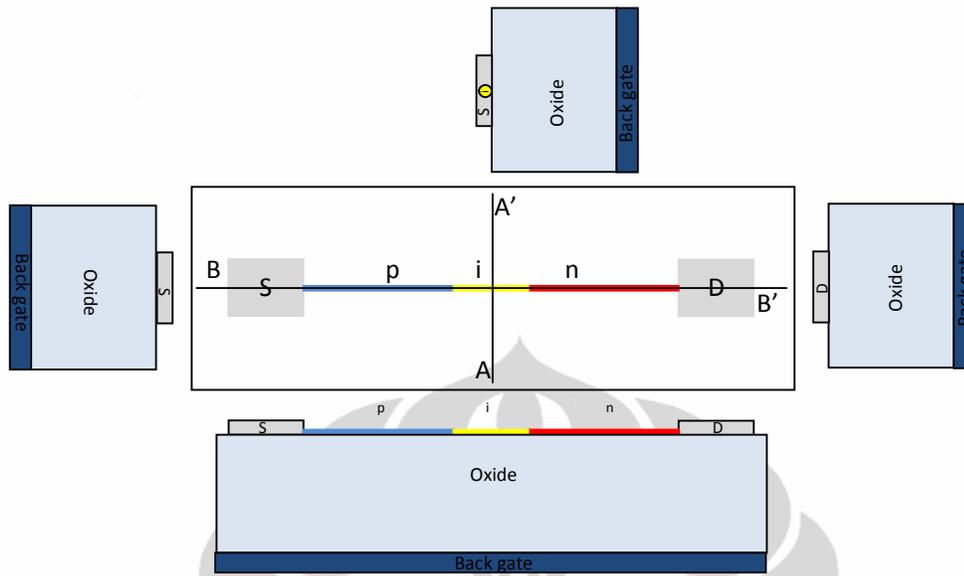
Tahap ini dimulai setelah penumbuhan *i-type* SiNW selesai kemudian SiNW ditumbuhkan kembali hingga mencapai ukuran *n-type* SiNW yang diinginkan selanjutnya memberikan dopan pospor pada SiNW sesuai dengan konsentrasi yang diinginkan.

Pada Gambar 3.3 digambarkan skema struktur p-i-n SiNW, ilustrasi pergerakan elektron dan hole dan diagram pita energi pada saat p-i-n SiNW diberikan bias *reverse* kemudian terjadinya proses *avalanche*.

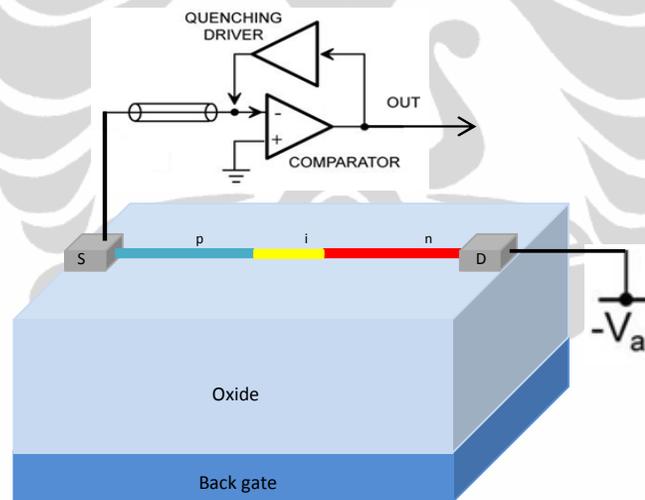


Gambar 3.3 a. Skema struktur p-i-n SiNW, pada bagian kuning merupakan katalis *nanoclusters* Au tempat penumbuhan sekuensial struktur p-i-n SiNW, b. Skema ilustrasi pergerakan elektron dan *hole* pada p-i-n SiNW dan c. Diagram pita energi dari struktur p-i-n SiNW pada saat *reverse* bias.

Pada Gambar 3.4 menggambarkan skema rancangan SiNW yang dibuat pada tesis ini, sedangkan Gambar 3.5 menggambarkan skema fisik divais *nanoscaled-base single photon avalanche diode*.



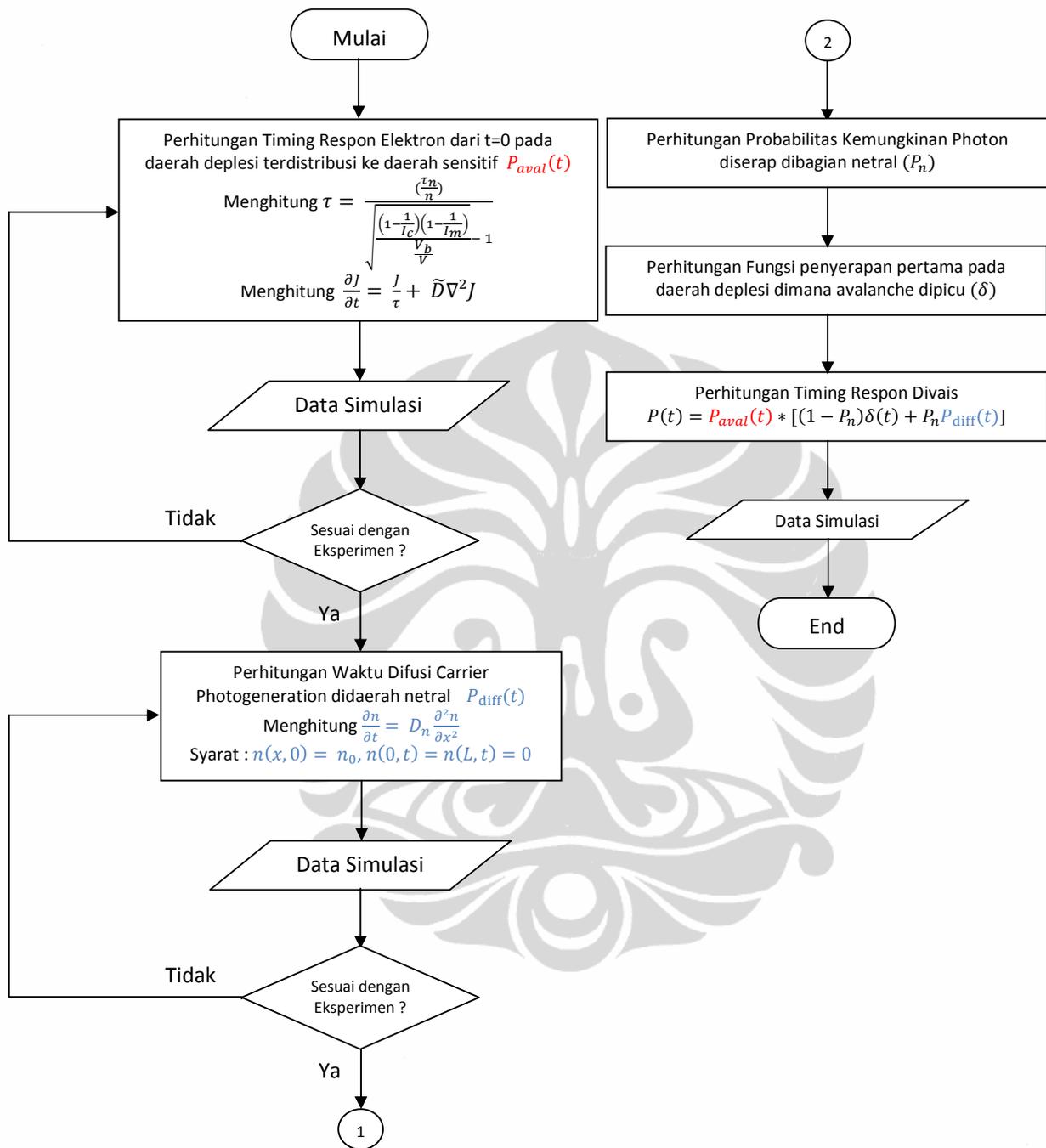
Gambar 3.4 Skema rancangan *heterostructure silicon nanowire*.



Gambar 3.5 Skema *nanoscaled-base single photon avalanche diode*.

### 3.2. Diagram Alir Proses Simulasi.

Diagram alir dari proses simulasi yang dilakukan diperlihatkan pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Diagram Alir Simulasi

### 3.3 Perancangan Simulasi *Nanoscale-based Single Photon Avalanche Diode*

Simulasi *nanoscale-based simple photon avalanche diode* menggambarkan terjadi difusi yang didapat persamaan kontinuitas untuk elektron dan *hole* dari persamaan Poisson yang diperlihatkan pada Persamaan (3.1), Persamaan (3.2) dan Persamaan (3.3).

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (3.2)$$

$$\varepsilon \nabla^2 \psi = q(n - p + N_a - N_d) \quad (3.3)$$

dimana  $\vec{J}_n$  dan  $\vec{J}_p$  adalah densitas arus elektron dan *hole* dan  $\psi$  adalah potensial elektrostatik. Dalam persamaan di atas  $G_n - R_n = G_p - R_p = \alpha n v_n + \beta p v_p$  untuk generasi *carrier* oleh *impact ionization*. Penyerapan foton diwakili oleh kondisi awal  $n(\vec{r}, 0) = p(\vec{r}, 0) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_0)$ . Densitas arus pada Persamaan 3.1 dan Persamaan 3.2 dapat dinyatakan dalam Persamaan 3.4 dan Persamaan 3.5.

$$\vec{J}_n = -q\mu_n n \nabla \psi - q \nabla (D_n n) \quad (3.4)$$

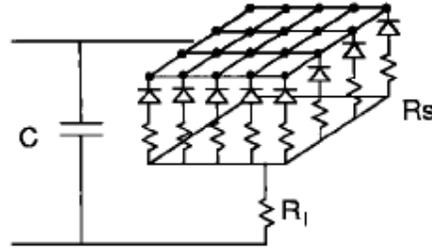
$$\vec{J}_p = -q\mu_p p \nabla \psi - q \nabla (D_p p) \quad (3.5)$$

dimana  $D_n$  dan  $D_p$  adalah koefisien difusi elektron dan *hole* dalam tinggi medan listrik,  $\mu_n$  dan  $\mu_p$  adalah elektron dan *hole*.

#### 3.3.1 Perhitungan *Timing Response Avalanche*

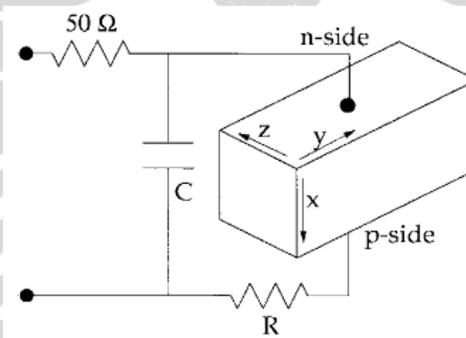
Model yang digunakan disederhanakan dalam deskripsi mikroskopis pembawa dinamika namun mampu menggambarkan penyebaran *avalanche* pada divais. Divais dapat digambarkan sebagai sebuah dasar perangkat yang terhubung

secara paralel seperti yang terlihat pada Gambar 3.7, sedangkan daerah netral dalam struktur digambarkan dengan jaringan resistor.



Gambar 3.7 Skema model dari struktur divais yang digunakan [14].

Dengan asumsi mempertimbangkan muatan *free carrier* efektif hanya dalam arah  $x$  lihat Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Simulasi pergerakan *carrier* dengan arah  $y$  diabaikan [14].

Efek muatan dalam masing-masing elemen dimodelkan dengan nonlinier *space charge resistance* dalam Persamaan 3.6.

$$\tau = \frac{\left(\frac{\tau_n}{n}\right)}{\sqrt{\frac{\left(1 - \frac{1}{I_s}\right)\left(1 - \frac{1}{I_m}\right)}{\frac{V_b}{V}} - 1}} \quad (3.6)$$

dimana  $I_c$  adalah arus saturasi, dan  $I_m = V/R$ , dimana  $R$  merupakan resistensi yang dipasang seri pada daerah deplesi. Difusi lateral divais diperlihatkan pada Persamaan 3.7.

$$\frac{\partial J}{\partial t} = \frac{J}{\tau} + \tilde{D} \nabla^2 J \quad (3.7)$$

dimana koefisien  $\tilde{D} = 17 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . menjadi nilai efektif tergantung pada koefisien difusi elektron dan *hole* dan  $\frac{\tau_n}{n} = 0.3 \text{ ps}$ .

### 3.3.2 Perhitungan Difusi *Carrier Photogenerated*

Diasumsikan bahwa *avalanche* ini dipicu oleh foton diserap di daerah deplesi. Meskipun komponen cepat, waktu eksperimental respon menunjukkan adanya ekor, yang ditentukan oleh *carrier photogenerated* di daerah netral di bawah persimpangan dan mencapai daerah medan listrik oleh difusi. Namun, bentuk ekor dapat diperoleh dengan model analitis sederhana, misalkan wilayah netral yang membentang dari  $x = 0$ , yang tepi daerah deplesi, untuk  $x = L$ . Jika diabaikan rekombinasi dari *carrier*, persamaan kontinuitas untuk elektron pada Persamaan 3.3

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (3.3)$$

dimana  $D_n$  adalah koefisien difusi dalam kondisi *quasi-equilibrium*, yaitu sekitar  $20 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . batas kondisi untuk  $n(x, t)$  pada Persamaan 3.16 adalah terdapat pada Persamaan 3.4 dan Persamaan 3.5

$$n(x, 0) = n_0 \quad (3.4)$$

$$n(0, t) = n(L, t) = 0 \quad (3.5)$$

yang sesuai dengan asumsi *photogeneration* seragam elektron di lapisan netral. Persamaan 3.6 dapat dipecahkan dengan ekspansi deret *Fourier*, untuk mendapatkan arus di tepi wilayah netral difusi.

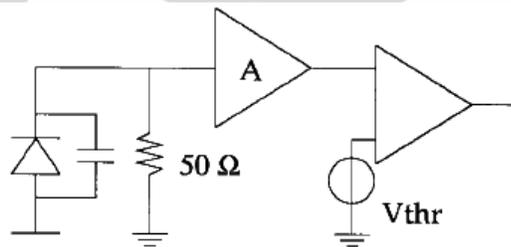
$$J_n(0, t) = \frac{4qn_0D_n}{L} \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left[-\frac{(2k+1)^2\pi^2D_n}{L^2}\right] \quad (3.6)$$

### 3.3.3 Perhitungan *Timing Response*

Tujuan akhir dari simulasi pada tesis ini adalah memperoleh perhitungan *timing response*  $P(t)$  divais yang dapat ditulis dalam Persamaan 3.20.

$$P(t) = P_{aval}(t) * [(1 - P_n)\delta(t) + P_n P_{diff}(t)] \quad (3.7)$$

dimana  $P_n$  adalah probabilitas untuk foton diserap di lapisan netral, dan  $P_{aval}(t)$  merupakan respon waktu dihasilkan dari elektron yang terletak di wilayah penipisan pada  $t = 0$  tanggal dan secara acak didistribusikan ke detektor sensitif daerah. Akun  $\delta$  fungsi serapan utama langsung di lapisan habis, dimana proses longsor dapat segera mulai, sedangkan account  $P_{diff}(t)$  untuk terbatas difusi waktu untuk *carrier photogenerated* di daerah netral. Perhitungan  $P_{aval}(t)$  memerlukan tegangan *threshold* rangkaian quenching 0,2 mA. Pada Gambar 3.9 diperlihatkan skema divais SPAD, opAmp dan diskriminator ideal.



Gambar 3.9 Skema divais dengan diskriminator [14].

*Jitter noise* elektronik yang mempengaruhi *timing response* dapat dinyatakan dalam Persamaan 3.8.

$$\bar{t}^2 = \frac{\overline{v_n^2}}{S^2} \quad (3.21)$$

**BAB 4**  
**SIMULASI DAN ANALISA HASIL SIMULASI**  
***NANOSCALE-BASED SINGLE PHOTON AVALANCHE DIODE***

Usaha untuk memfabrikasi suatu divais memerlukan biaya yang mahal dan waktu yang tidak sedikit. Oleh karena itu untuk mengetahui hasil perancangan yang dilakukan pada BAB 3, kami melakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB<sup>®</sup> yang didistribusikan oleh MathWorks<sup>®</sup> sebuah perusahaan pengembang software komputasi matematika.

#### **4.1 Perangkat Lunak MATLAB<sup>®</sup>.**

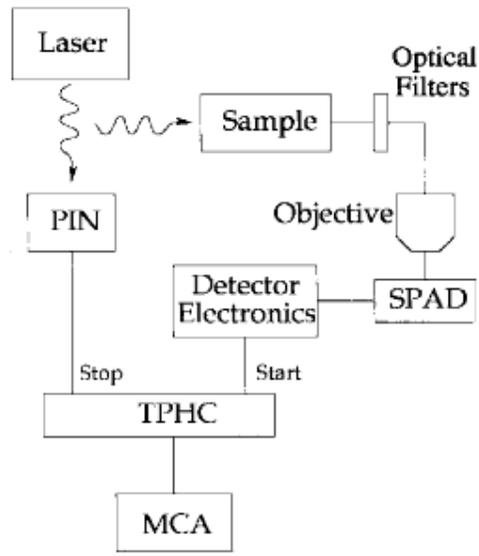
MATLAB<sup>®</sup> adalah perangkat lunak berbahasa pemrograman tingkat tinggi untuk teknik komputasi dengan layanan yang interaktif untuk pengembangan algoritma, visualisasi data, analisis data, dan komputasi numerik. MATLAB<sup>®</sup> dapat menyelesaikan masalah komputasi teknis lebih cepat dibandingkan dengan bahasa pemrograman tradisional, seperti C, C ++, dan Fortran.

MATLAB<sup>®</sup> dapat dipakai dalam berbagai aplikasi, termasuk pemrosesan sinyal dan gambar, komunikasi, desain kontrol, [uji dan pengukuran](#), model dan analisis keuangan, dan [biologi komputasi](#).

#### **4.2 Simulasi *Nanoscaled-based Single Photon Avalanche Diode*.**

Tujuan utama dari simulasi *Nanoscaled-based Single Photon Avalanche Diode* adalah mengetahui tingkat responsif dalam satuan waktu dari divais sebagai pendeteksi foton tunggal. Semakin cepat tingkat responsif dari divais semakin akurat pendeteksian foton tunggal dalam suatu sistem *photon timing*.

Salah satu contoh setting perangkat eksperimen dari sistem *photon timing* dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Setting perangkat eksperimen *photon timing* [14].

Simulasi dilakukan terhadap rancangan divais dengan parameter yang ditentukan seperti yang diuraikan dibawah ini.

#### Divais

Struktur divais	: p-i-n
Diameter divais	: 20 nm
Panjang divais	: $\pm 7 \mu\text{m}$ ( 2.88 $\mu\text{m}$ ; 1.08 $\mu\text{m}$ ; 2.88 $\mu\text{m}$ )
Bahan	: Silicon Nanowire
Konstanta dielektrik	: 11,9
Band Gap	: $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
Konsentrasi doping tipe p	: $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Konsentrasi doping tipe n	: $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

#### Laser diode

Panjang Gelombang	: 488 nm
-------------------	----------

#### 4.2.1 Perhitungan *Timing Response* Pasangan Elektron dan *Hole* Pada Saat Penyebaran *Avalanche*

Persamaan (3.1), Persamaan (3.2) dan Persamaan (3.3) pada Bab 3 adalah Persamaan Poisson yang dipakai pada tesis ini adalah untuk menjelaskan terjadi

penyebaran *avalanche* pada daerah aktif SPAD dalam bentuk umum dapat ditulis pada Persamaan (4.1).

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (4.1)$$

atau dalam dua dimensi dapat ditulis sebagai Persamaan (4.2).

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{1}{\epsilon_0} p(x, y) \quad (4.2)$$

Dimana  $f(x, y) = -p(x, y)/\epsilon_0$  adalah densitas pada koordinat  $(x, y)$ .

Persamaan Poisson ini secara numerik dapat diselesaikan dengan menggunakan metode Jacobi atau Gauss-Seidel yang digunakan pada persamaan Laplace, karena  $f(x, y)$  dapat dikatakan tidak bergantung waktu. Bentuk persamaan iterasi dengan metode Jacobi yang di pakai dapat ditulis sebagai Persamaan (4.3) dan Persamaan (4.4).

$$V_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{4} \left\{ V(i+1, j) + V(i-1, j) + V(i, j-1) + \frac{1}{\epsilon_0} h^2 p_{i,j} \right\} \quad (4.3)$$

atau

$$V_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{4} \{ V(i+1, j) + V(i-1, j) + V(i, j-1) - h^2 f(i, j) \} \quad (4.4)$$

Dapat juga digunakan metode FTCS sesuai Persamaan 4.5.

$$\frac{1}{h_x^2} \{ V(i+1, j) - 2V(i, j) + V(i-1, j) \} + \frac{1}{h_y^2} \{ V(i, j+1) - 2V(i, j) + V(i, j-1) \} = f(i, j) \quad (4.5)$$

atau

$$2 \left[ \left( \frac{h_x}{h_y} \right)^2 + 1 \right] V(i, j) - (V(i+1, j) + V(i-1, j)) - \left( \frac{h_x}{h_y} \right)^2 (V(i, j+1) + V(i, j-1)) = -h_x^2 f(i, j) \quad (4.6)$$

Dengan menganggap  $h_x = h_y = h$  maka persamaan diatas menjadi Persamaan (4.7).

$$4V(i, j) - (V(i + 1, j) + V(i - 1, j)) - (V(i, j + 1) + V(i, j - 1)) = -h^2 f(i, j) \quad (4.7)$$

andaikan  $i=1\dots n-1$  dan  $j=1\dots m-1$  maka diperoleh  $((n-1)*(m-1)) \times ((n-1)*(m-1))$ , sistem persamaan linier ini dapat diselesaikan dengan melakukan transformasi pelabelan titik di mana :

$$Pk = (xi, yi) \text{ dengan } k = i + (m - 1 - j)(n - 1)$$

$$Vk = V(i, j); \text{ di mana } i = 1 \dots (n - 1) \text{ dan } j = 1 \dots (m - 1)$$

Andaikan  $n = 4$  dan  $m = 5$  maka akan diperoleh 12 (3X4) titik internal dari bidang distribusi elektron atau *hole*.

Titik-titik pada sisi bidang telah ditentukan sebagai syarat awal maupun syarat batas, yaitu :

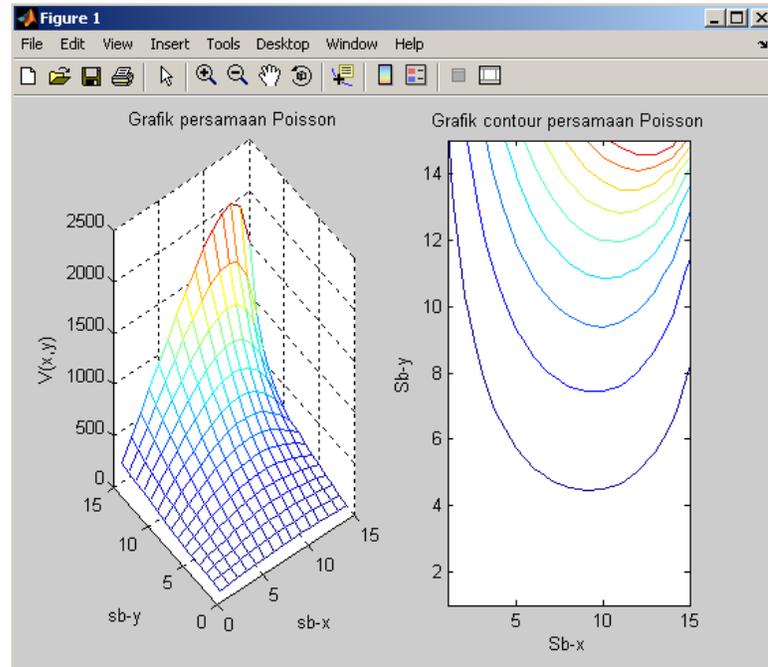
$$V(0, j) = f(x_0, y) \quad \text{untuk } j = 0 \dots m$$

$$V(i, 0) = f(xi, 0) \quad \text{untuk } i = 0 \dots n$$

$$V(n, j) = f(xn, yj) \quad \text{untuk } j = 0 \dots m$$

$$V(i, m) = f(xi, ym) \quad \text{untuk } i = 0 \dots n$$

Gambar 4.2 menunjukkan grafik dari persamaan poisson hasil simulasi.



Gambar 4.2 Grafik simulasi dari persamaan poisson

#### 4.2.2 Persamaan Difusi

Persamaan difusi elektron dan *hole* dapat dinyatakan pada Persamaan Diferensial Parsial seperti yang terlihat pada Persamaan (4.8) atau Persamaan (4.9).

$$D \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{\partial V}{\partial x^2} = 0 \quad (4.8)$$

atau

$$\frac{\partial V}{\partial t} = D \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad (4.9)$$

Dimana  $V(x, t)$  menyatakan elektron atau *hole* pada lokasi  $x$  dan waktu  $t$ , dan  $D$  adalah koefisien difusi elektron atau *hole*. Persamaan difusi ini diselesaikan dengan penyelesaian analitis dengan fungsi Gauss.

$$V(x, t) = \frac{1}{\sigma(t)\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2(t)} \right] \quad (4.10)$$

Dimana  $x_0$  adalah lokasi dimana  $V(x, t)$  maksimum,  $\sigma(t)$  adalah standar deviasi yang nilainya bertambah dengan bertambahnya waktu dalam bentuk Persamaan (4.11) :

$$\sigma(t) = \sqrt{2Dt} \quad (4.11)$$

Jika  $t \rightarrow 0$ , maka  $\sigma(t) \rightarrow 0$ , sehingga fungsi Gaussian juga menuju nol, dan karena fungsi Gaussian ternormalisasi maka sebenarnya :

$$\lim_{t \rightarrow 0} V(x, t) = \delta(x - x_0) \quad (4.12)$$

dimana  $\delta(x)$  adalah fungsi delta Dirac

Bentuk  $V(x, t)$  untuk  $D = 1, t = (0.01, 0.02, 0.03, 0.04), x = [-0.5; +0.5]$ .

Dengan pendekatan ekspansi Taylor dapat ditulis dengan Persamaan (4.13) dan Persamaan (4.14) :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \{V(x, t + \tau) - V(x, t)\}/\tau \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \{V(x + h, t) - 2V(x, t) + V(x - h, t)\}/h^2 \quad (4.14)$$

Dengan demikian persamaan difusi dapat ditulis sebagai Persamaan (4.15) dan Persamaan (4.16) :

$$\frac{1}{\tau} \{V(x, t + \tau) - V(x, t)\} = \frac{D}{h^2} \{V(x + h, t) + V(x - h, t) - 2V(x, t)\} \quad (4.15)$$

atau

$$V(x, t + \tau) = V(x, t) + \frac{D\tau}{h^2} [V(x + h, t) + V(x - h, t) - 2V(x, t)] \quad (4.16)$$

**Universitas Indonesia**

Dengan menuliskan  $\lambda = D\tau/h^2$  dan menggunakan notasi iterasi maka persamaan iterasi dari persamaan diatas menjadi Persamaan (4.17) :

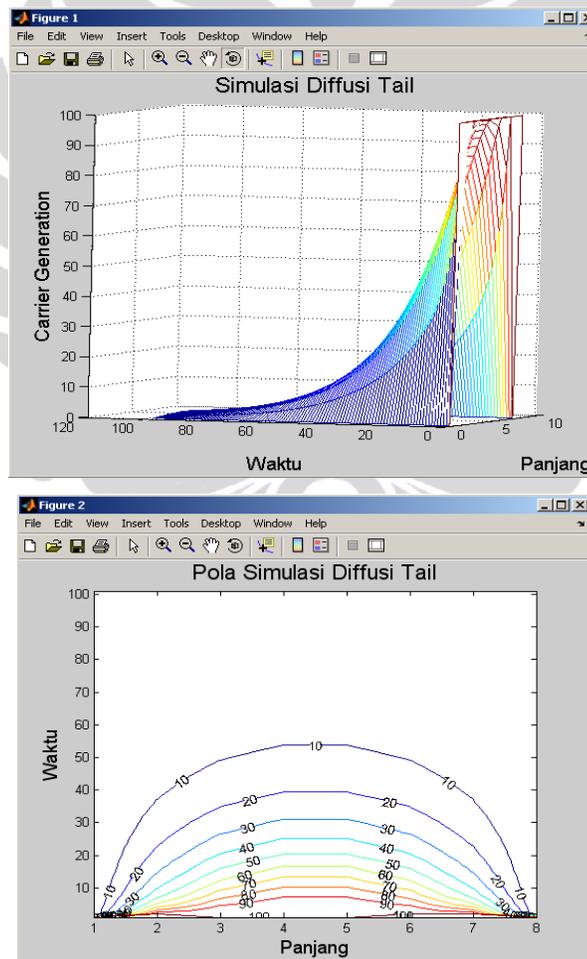
$$V(i, n + 1) = V(i, n) + \lambda[V(i + 1, n) - V(i - 1, n) - 2V(i, n)] \quad (4.17)$$

Dengan syarat awal dan syarat batas :

$$V(i, 0) = f(x) \quad \text{untuk syarat awal mula-mula suhu berbentuk } f(x)$$

$$V(0, t) = V(L, t) = 0 \quad \text{untuk syarat batas dengan } 0 < x < L, \text{ dan } t > 0$$

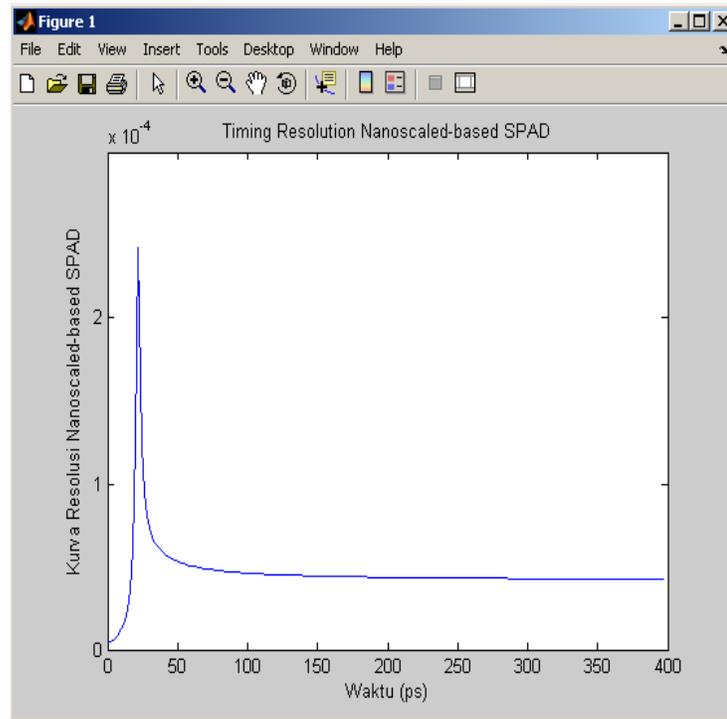
Gambar 4.2 menunjukkan grafik dari hasil simulasi persamaan difusi.



Gambar 4.3 Grafik dari hasil simulasi persamaan difusi.

### 4.2.3 Perhitungan *Timing Response* Divais

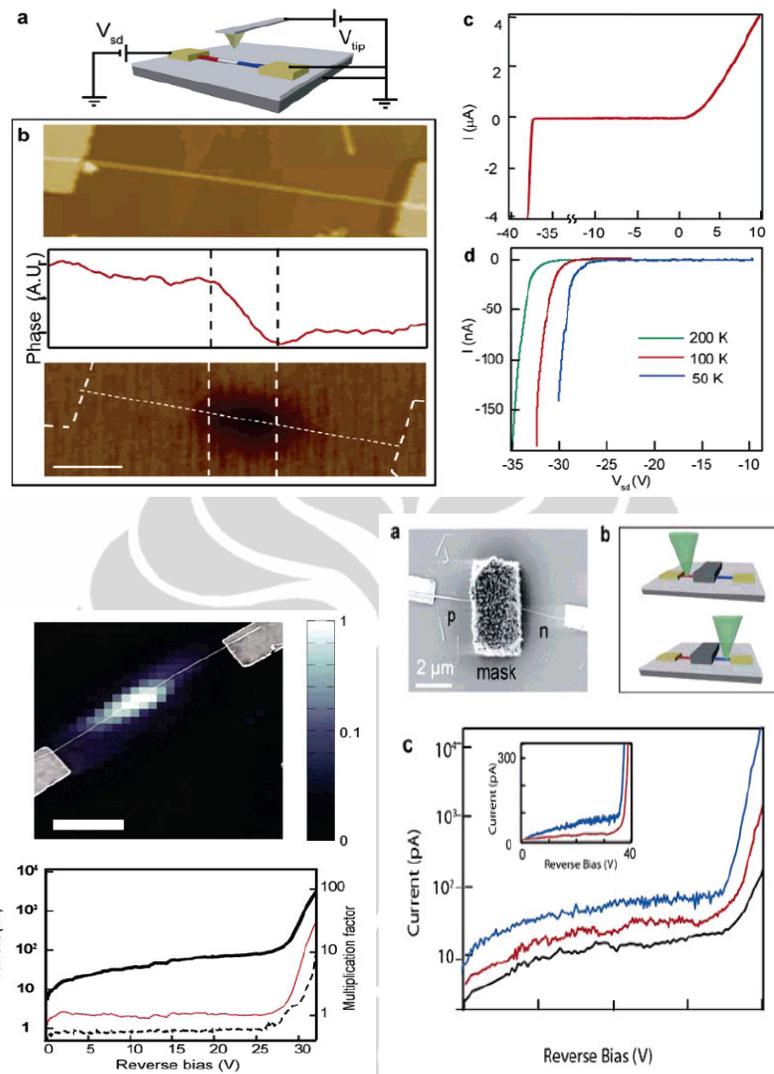
Perhitungan *timing response* divais berdasarkan Persamaan (3.7) pada Bab 3, didapatkan *timing response Nanoscaled-based SPAD* sebesar 30 ps.



Gambar 4.4. Grafik hasil simulasi *timing response* divais

### 4.3 Data Eksperimen

Data eksperimen yang digunakan pada tesis ini yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 mengacu pada hasil eksperimen terhadap *heterostructure silicon nanowire* dengan struktur p-i-n dengan sumber foton berasal dari laser diode dengan panjang gelombang 488 nm [15].



Gambar 4.5 Data eksperimen p-i-n *heterostructure silicon nanowire* [15].

#### 4.4 Analisa Struktur p-i-n pada *Silicon Nanowire*

Struktur p-i-n *heterostructure silicon nanowire* yang digunakan mempunyai daerah deplesi yang lebih lebar dibandingkan dengan struktur *p-n junction*, hal ini dipengaruhi oleh Persamaan (4.18).

$$W = \left\{ 2\epsilon \left[ \left( \frac{1}{N_D} \right) + \left( \frac{1}{N_A} \right) \right] \times [(V_D + V_A)/e] \right\}^{1/2} \quad (4.18)$$

#### 4.5 Analisa Konsentrasi Doping Tipe-n dan Tipe-p

Substrat dasar SiNW adalah silikon tipe-p yang kemudian menjadi bagian basis. Tipe-i ditumbuhkan diatas permukaan tipe-p, kemudian tipe-n agar terjadi *pin-junction* Konsentrasi tipe-n dan tipe-p dibuat berbeda, yaitu tipe-p dirancang dengan konsentrasi yang lebih tinggi dari tipe-n. Tujuan pembuatan tipe-p dengan konsentrasi yang lebih tinggi dari tipe-n karena tipe-p akan digunakan sebagai emiter sebagai sumber elektron yang langsung mengenai foton tunggal. Adanya unsur tipe i dan tingkat konsentrasi mempengaruhi lebar daerah deplesi pada *junction* yang berarti juga akan mempengaruhi probabilitas pengumpulan yang mempunyai nilai satu menjadi semakin luas. Daerah deplesi yang lebar dapat dicapai dengan memberikan konsentrasi yang rendah. Tetapi doping konsentrasi yang rendah akan menyebabkan medan listrik yang terbentuk pada *junction* menjadi kecil. Penentuan tingkat konsentrasi untuk tipe-p dan tipe-n berdasarkan hasil penelitian dalam jurnal yaitu konsentrasi tipe p adalah  $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , sementara konsentrasi untuk tipe -n adalah  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

## BAB 5

### KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan analisa dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Tersedianya rancangan single photon avalanche diode berskala nano berbasis *heterostruture Silicon Nanowire* (SiNW) berdiameter 20 nm dengan struktur divais p-i-n dengan panjang 2.88-1.08-2.88  $\mu\text{m}$  dan konsentrasi dopant tipe p sebesar  $8 \times 10^{19} /\text{cm}^3$  dan tipe n sebesar  $5 \times 10^{19} /\text{cm}^3$  yang memiliki daerah operasi kerja diatas tegangan *breakdown* 38 V .
2. Berdasarkan rancangan single photon avalanche diode berskala nano dibuat simulasi perhitungan respon divais sebagai pendeteksi foton tunggal dengan perangkat lunak Matlab mencapai 30 ps .

## DAFTAR REFERENSI

1. <http://id.wikipedia.org/wiki/Foton> diakses tanggal 10 juli 2010
2. “Introduction to *Journal of Modern Optics Special Issue on Single-photon: detectors, applications, and measurement methods*”, *journal of modern optics*, 15 june–10 july 2004 vol. 51, no. 9–10, 1265–1266.
3. Richard S Muller, Theodore I. Kamins. “ *Device Electronis for Integrated Circuits Second edition* “ Singapore, 1986.
4. [http://en.wikibooks.org/wiki/Semiconductors/What\\_is\\_a\\_Semiconductor](http://en.wikibooks.org/wiki/Semiconductors/What_is_a_Semiconductor) diakses 10 September 2010.
5. [http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/ch4\\_2.htm](http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/ch4_2.htm) diakses 10 September 2010.
6. [http://en.wikipedia.org/wiki/P-n\\_junction](http://en.wikipedia.org/wiki/P-n_junction) diakses 10 Agustus 2010.
7. S. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley & Sons, Inc., 1981.
8. E. Schubert, “Reverse-Biased PN Junctions,” 2010.
9. S. Sze, *Semiconductor Devices : Physics and Technology*, John Wiley & Sons, Inc.,Canada, 1985.
10. F. Zappa, S. Cova; M. Ghioni, A. Lacaita, C. Samori (1996-04-20). "[Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection](#)" *Applied Optics* 35 (12): 1956–1976.
11. Christiana Honsberg, Stuart Bowden, “*Photovoltaic: devices, Systems and Aplication PVCDROM 1.0* “, Australia, 1999.
12. Erts, D., Polyakov B., Saks E., Olin H., Ryen L., Ziegler K., and Holmes JD., 2004, *Semiconductor Nanowires: Properties and Architectures*, *Solid State Phenomena Vols. 99-100*, 109-116.
13. V. Kumar, *Nanosilicon*, Elsevier, Ltd., China, 2007.
14. A. Spinelli and A. Lacaita, “Physics and numerical simulation of single photon avalanche diodes,” *IEEE Trans. Electron. Devices*, vol. 44, no. 11, pp. 1931–1943, Nov. 1997.

15. Chen Yang, Carl J. Barrelet, Federico Capasso, and Charles M. Lieber, "Single p-Type/Intrinsic/n-Type Silicon Nanowires as Nanoscale Avalanche Photodetectors," NANO LETTERS 2006 Vol. 6, No. 12 2929-2934, Oct. 2006.



## LAMPIRAN

