

## Ujian Akhir Semester

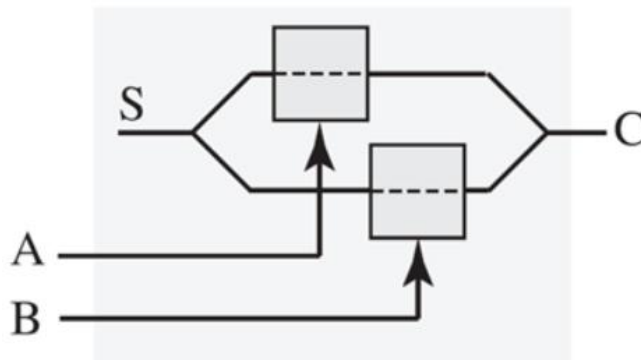
### EL – 4023 Optoelektronik

#### Perancangan Gerbang Logika Fotonik NAND

Nama: Justin Aprio Chan

NIM: 13222039

Rancang sebuah gerbang NAND fotonik menggunakan komponen devais fotonik yang meliputi salah satu komponen berikut: Y-Branch, directional coupler, ring resonator, grating coupler, phase shift modulator. Panjang gelombang yang digunakan adalah 1550 nm.



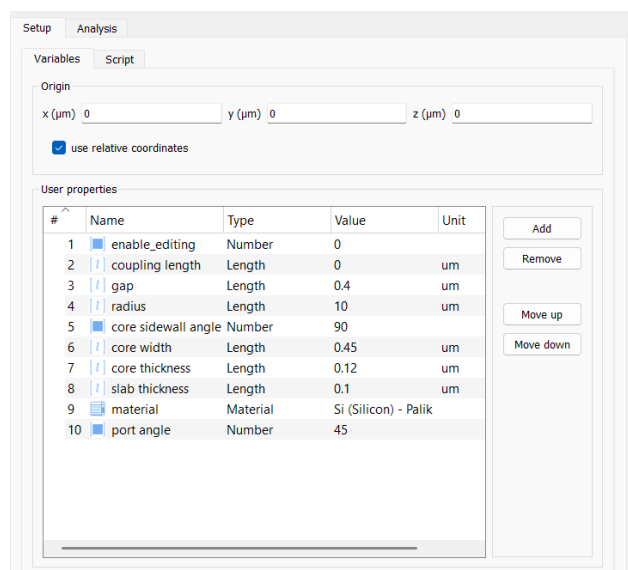
Gambar 1 - Rangkaian Fotonik Gerbang Logika NAND

Rangkaian difabrikasi pada substrat wafer SOI dengan menggunakan PDK SiEPIC (<https://github.com/SiEPIC/SiEPICfab-EBeam-ZEP-PDK>) yang memiliki data berikut:

- Tebal Silikon 220 nm (Silikon tipe-P, dengan doping  $\sim 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )
- Tebal BOX max 3500 nm

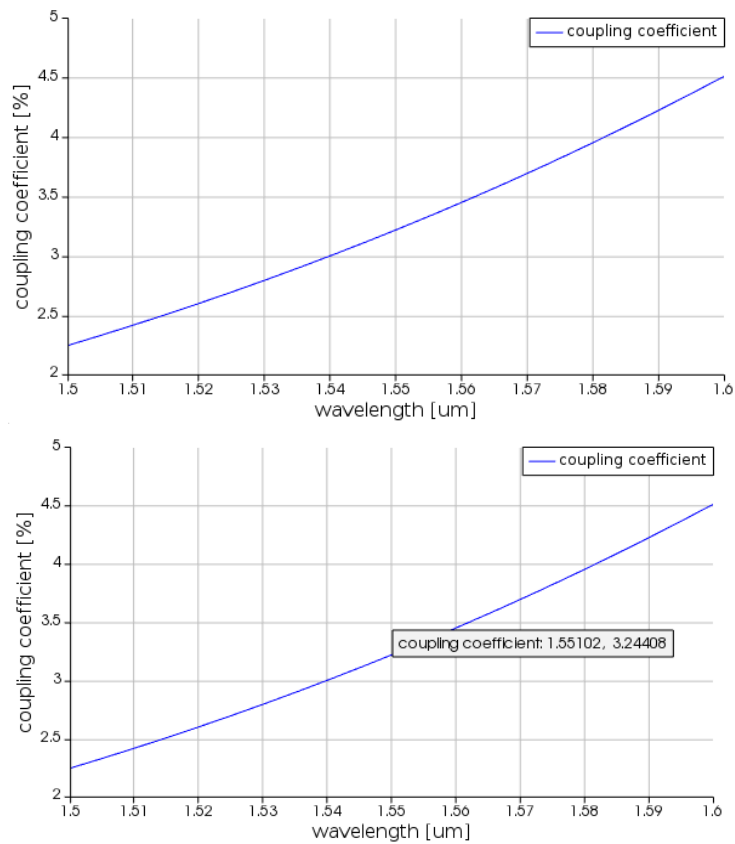
Perancangan awal akan dilakukan dengan menggunakan Ring Modulator dengan langkah berikut:

#### 1. Coupler



Gambar 2 – Tampilan Data Tebal Silikon

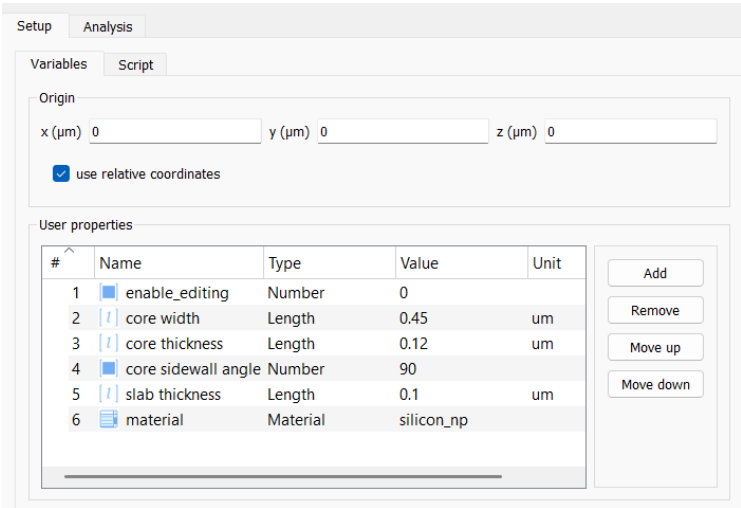
Dapat diperhatikan bahwa tebal silikon SOI adalah penambahan antara core thickness dan slab thickness, yaitu  $0.12+0.1 = 0.22 \text{ }\mu\text{m}$  atau 220 nm.



**Gambar 3 – Grafik Simulasi Coupling Coefficient**

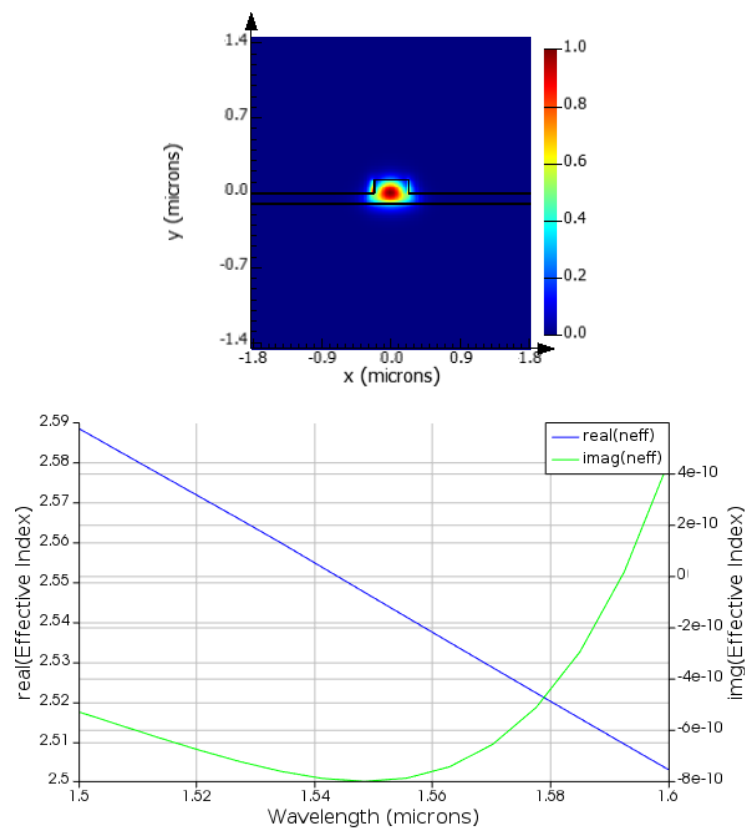
Berdasarkan grafik diatas, pada panjang gelombang mendekati 1550 nm, yaitu di 1551,02 nm akan memiliki nilai koefisien kopling (coupling coefficient) 3.24408 %

2. Passive Straight and Bent Waveguide



**Gambar 4 – Tampilan Data Tebal Silikon**

### a. Straight Passive Waveguide

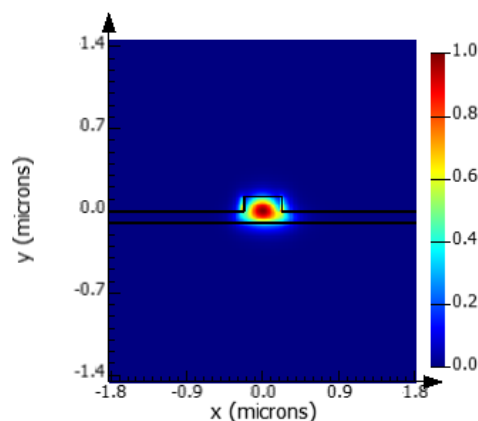


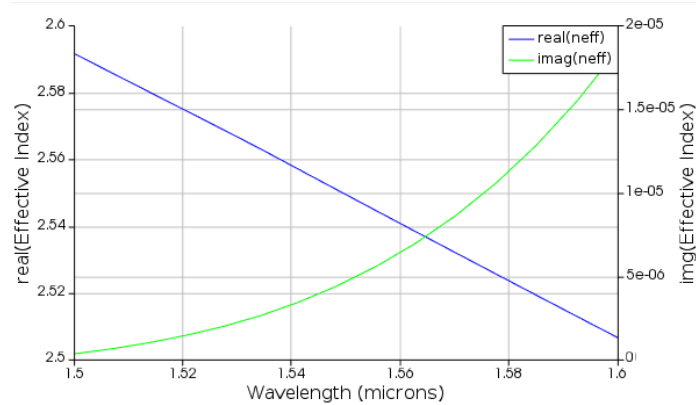
**Gambar 5– Grafik Simulasi Straight Passive Waveguide**

Grafik biru menunjukkan bagian real dari indeks efektif (neff) dengan nilai menurun seiring peningkatan panjang gelombang. Pada 1550 nm, terlihat nilai real neff di sekitar 2.545.

Grafik hijau menunjukkan bagian imajiner dari indeks efektif, yang berhubungan langsung dengan rugi propagasi (propagation loss). Pada 1550nm, terlihat nilai imajiner neff di sekitar -8e-10 yang mengindikasikan rugi-rugi propagasi yang sangat rendah pada straight passive waveguide.

### b. Bent Passive Waveguide





**Gambar 6– Grafik Simulasi Bent Passive Waveguide**

Pada desain gerbang NAND fotonik, digunakan bend radius yang dimodifikasi menjadi **10.1 $\mu\text{m}$** . Pemilihan radius ini bertujuan untuk secara sengaja menggeser titik resonansi alami (natural resonance) dari ring modulator menjauh dari panjang gelombang operasi target. Hal ini memastikan bahwa pada saat tidak ada tegangan input (logika '0'), ring berada dalam kondisi OFF-resonance pada 1550 nm, sehingga menghasilkan rugi-rugi transmisi yang rendah dan output logika '1'. Kondisi ini merupakan prasyarat fungsional untuk sebuah inverter logika, yang menjadi fondasi untuk membangun gerbang NAND dengan arsitektur paralel. Desain ini dibuat agar saat tegangan input '1' diterapkan, pergeseran fasa yang terjadi mampu membawa ring kembali ke kondisi ON-resonance tepat pada 1550 nm, sehingga menghasilkan output logika '0'.

Grafik biru menunjukkan bagian riil dari indeks efektif (neff) dengan nilai menurun seiring peningkatan panjang gelombang, yang mengindikasikan adanya dispersi. Pada 1550 nm, terlihat nilai riil neff di sekitar 2.55.

Grafik hijau menunjukkan bagian imajiner dari indeks efektif, yang berhubungan langsung dengan rugi-rugi propagasi (propagation loss). Pada 1550 nm, terlihat nilai imajiner neff yang sangat kecil, sekitar  $5 \times 10^{-6}$ , yang mengindikasikan bahwa rugi-rugi propagasi intrinsik pada passive waveguide ini sangat minimal dan dapat diabaikan.

### 3. Charge Distribution

Edit Constant Doping

name

Geometry

x (μm)

x min (μm)

x span (μm)

x max (μm)

y (μm)

y min (μm)

y span (μm)

y max (μm)

z (μm)

z min (μm)

z span (μm)

z max (μm)

Applicable Domains

volume type

☐ use relative coordinates

Dopant

dopant type

concentration (cm<sup>-3</sup>)

OK

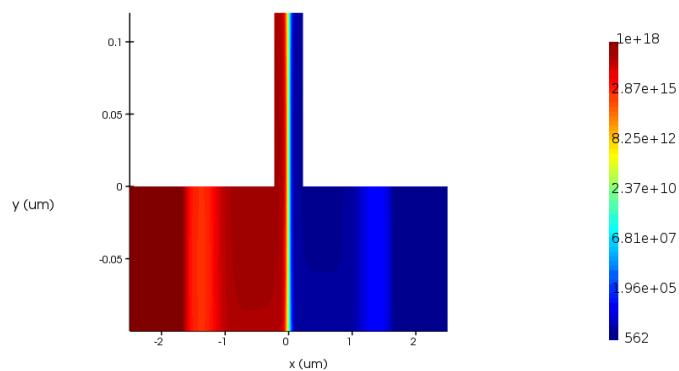
Apply

Cancel

**Gambar 7 – Tampilan Silikon Tipe-P dengan Doping yang Sesuai**

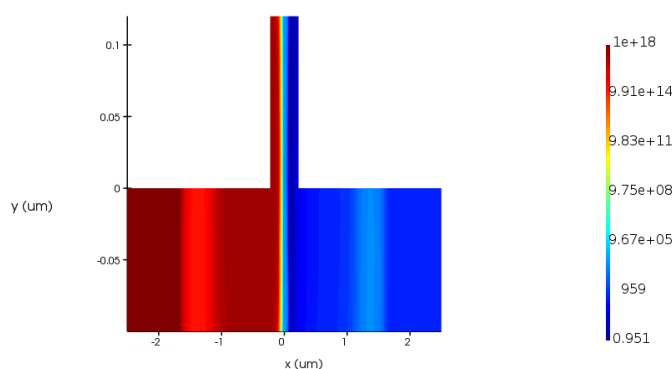
Simulasi charge distribution dilakukan pada silikon tipe-P dengan doping  $\sim 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  seperti yang terdapat di gambar di atas.

#### a. Anode Voltage 0V



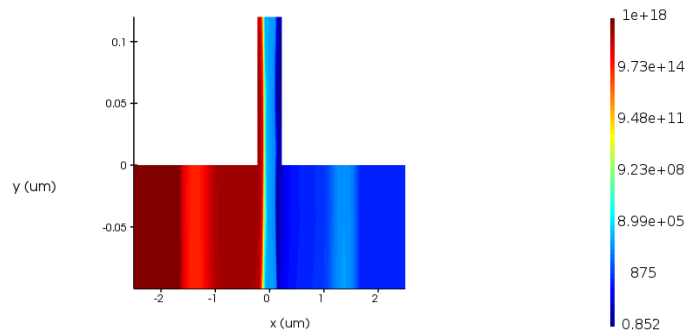
**Gambar 8 – Simulasi Charge Distribution 0V**

#### b. Anode Voltage -1V



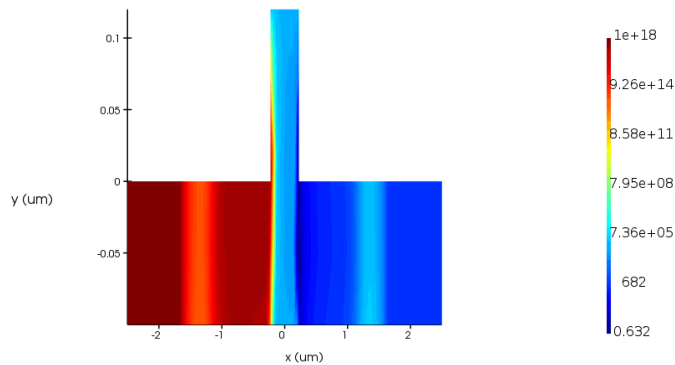
**Gambar 9 – Simulasi Charge Distribution -1V**

**c. Anode Voltage -4V**



**Gambar 10 – Simulasi Charge Distribution -4V**

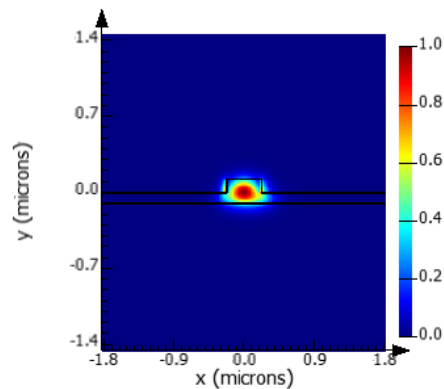
**d. Anode Voltage -10V**

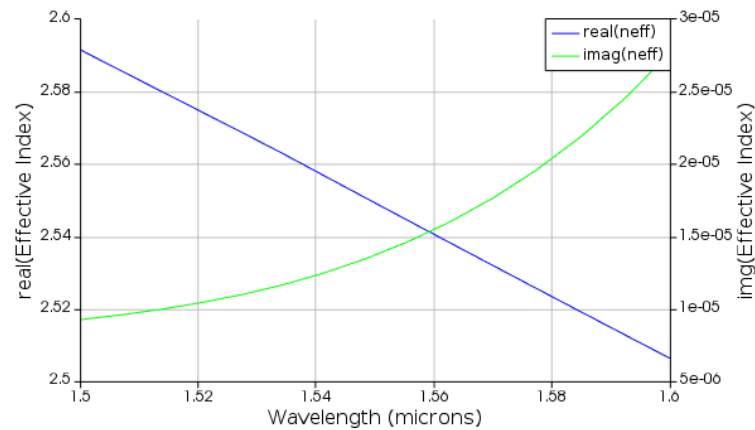


**Gambar 11 – Simulasi Charge Distribution -10V**

Dapat dilihat pada gambar bahwa seiring dengan kenaikan nilai tegangan reverse bias, medan listrik eksternal dari tegangan reverse bias akan memperkuat medan listrik internal di sambungan, sehingga secara aktif menarik pembawa muatan bebas menjauh dari sambungan, sehingga memperluas daerah deplesi dan membuatnya lebih terkuras dari pembawa muatan bebas

**4. Active Bent Waveguide**

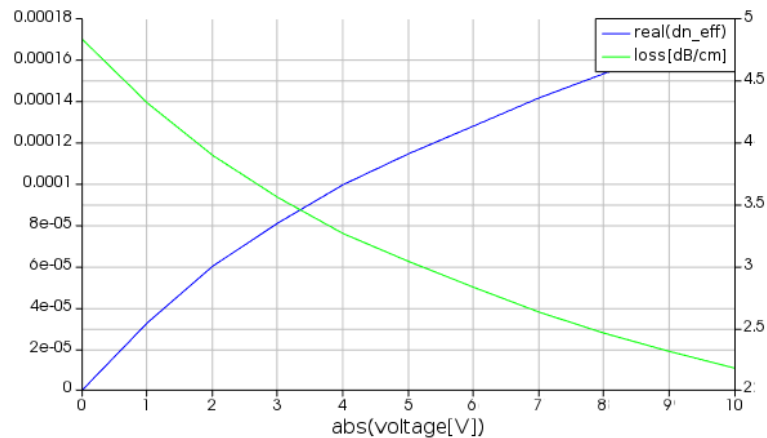




**Gambar 12 – Grafik Simulasi Active Bent Waveguide**

Pada grafik ini, dapat diperhatikan analisis indeks efektif (effective index) sebagai fungsi dari panjang gelombang untuk sebuah waveguide aktif. Grafik biru menunjukkan bagian riil dari indeks efektif (neff), dengan nilai yang menurun secara linear seiring peningkatan panjang gelombang akibat adanya dispersi. Pada panjang gelombang 1550 nm ( $1.55 \mu\text{m}$ ), terlihat nilai riil neff berada di sekitar 2.55.

Grafik hijau merepresentasikan bagian imajiner dari indeks efektif, yang berhubungan langsung dengan rugi-rugi propagasi (propagation loss). Pada 1550 nm, nilai imajiner neff teramati di sekitar  $1.4 \times 10^{-5}$ . Nilai ini, meskipun masih tergolong kecil, secara signifikan lebih tinggi daripada nilai yang ditemukan pada waveguide pasif tanpa doping. Ini menunjukkan bahwa terdapat rugi-rugi propagasi tambahan yang dominan disebabkan oleh serapan pembawa bebas (free-carrier absorption), sebuah konsekuensi dari adanya doping pada struktur untuk keperluan modulasi fasa.



**Gambar 13 – Grafik Simulasi Dneff dan loss**

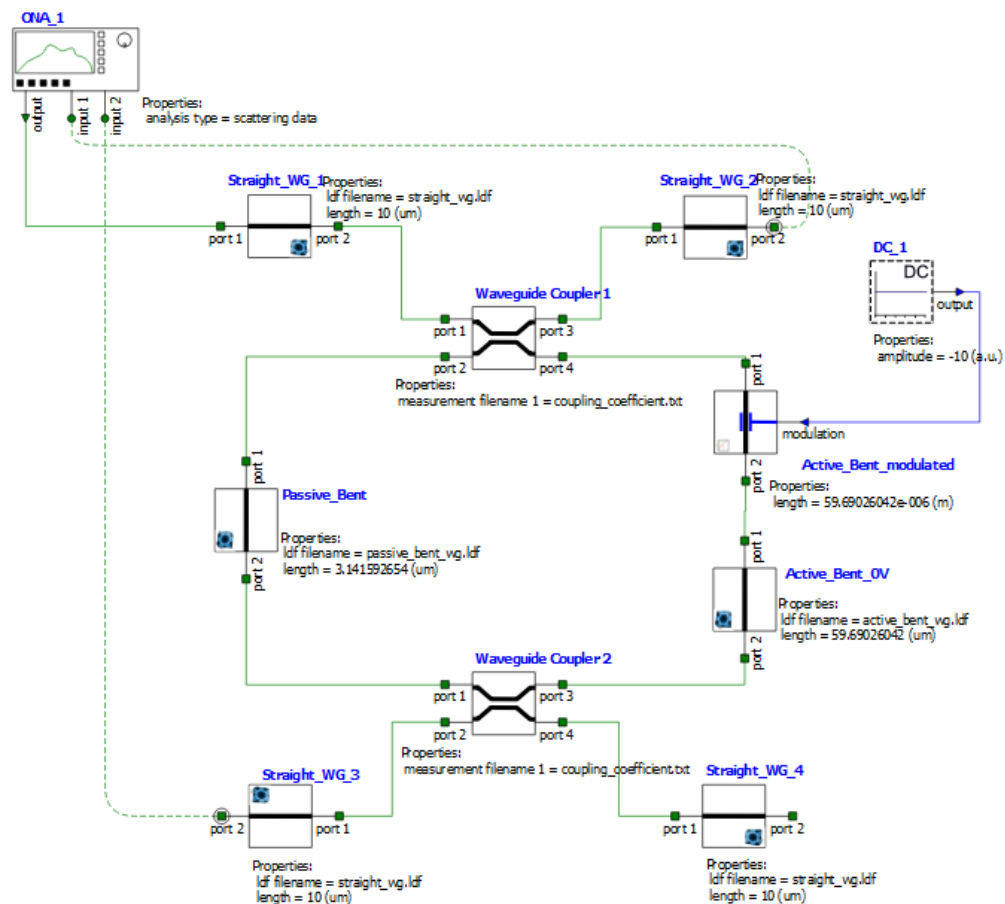
Grafik di atas menyajikan karakterisasi respons elektro-optik dari waveguide yang dimodulasi, di mana sumbu-X menunjukkan nilai absolut dari tegangan reverse bias dari 0V hingga 10V. Sumbu-Y kiri adalah perubahan bagian riil dari indeks efektif ( $\Delta n_{\text{eff}}$ ), sedangkan sumbu-Y kanan adalah rugi-rugi propagasi dalam dB/cm. Garis biru menunjukkan bahwa  $\Delta n_{\text{eff}}$  meningkat secara non-linear dengan meningkatnya tegangan, yang merupakan efek fisis yang dimanfaatkan untuk menggeser fasa cahaya. Sementara itu, garis hijau menunjukkan bahwa rugi-rugi propagasi menurun seiring meningkatnya tegangan reverse bias akibat melebarnya daerah deplesi yang mengurangi serapan pembawa muatan bebas.

Pemilihan tegangan operasi yang efisien memerlukan analisis kompromi antara kinerja modulasi ( $\Delta n_{\text{eff}}$ ), rugi-rugi optik (loss), dan konsumsi daya (tegangan). Meskipun

tegangan -10V memberikan perubahan indeks efektif paling maksimal, hal ini mengorbankan efisiensi daya. Berdasarkan analisis ini, tegangan **-4V** akan dipilih sebagai titik operasi yang paling mendekati optimal dan sangat efisien.

Alasannya adalah karena pada tegangan -4V, perubahan indeks efektif ( $\Delta n_{\text{eff}}$ ) telah mencapai nilai sekitar  $9.5 \times 10^{-5}$ . Nilai ini sudah merepresentasikan lebih dari 55% dari efek maksimal yang dicapai pada -10V, dan merupakan perubahan yang sangat substansial untuk menghasilkan pergeseran fasa yang cukup untuk operasi switching pada ring modulator. Keunggulan utamanya adalah penghematan daya yang sangat signifikan; berdasarkan hubungan daya  $P \propto V^2$ , penggunaan -4V hanya memerlukan 16% dari daya yang dibutuhkan untuk mengoperasikan devais pada -10V. Meskipun rugi-rugi propagasi pada -4V sedikit lebih tinggi (sekitar 3.3 dB/cm) dibandingkan pada tegangan maksimal, nilai ini masih tergolong rendah dan merupakan kompromi yang sangat baik demi efisiensi daya yang superior. Oleh karena itu, -4V dipilih sebagai tegangan yang paling mendekati optimal, menyeimbangkan antara kinerja modulasi yang efektif dengan konsumsi daya yang jauh lebih rendah.

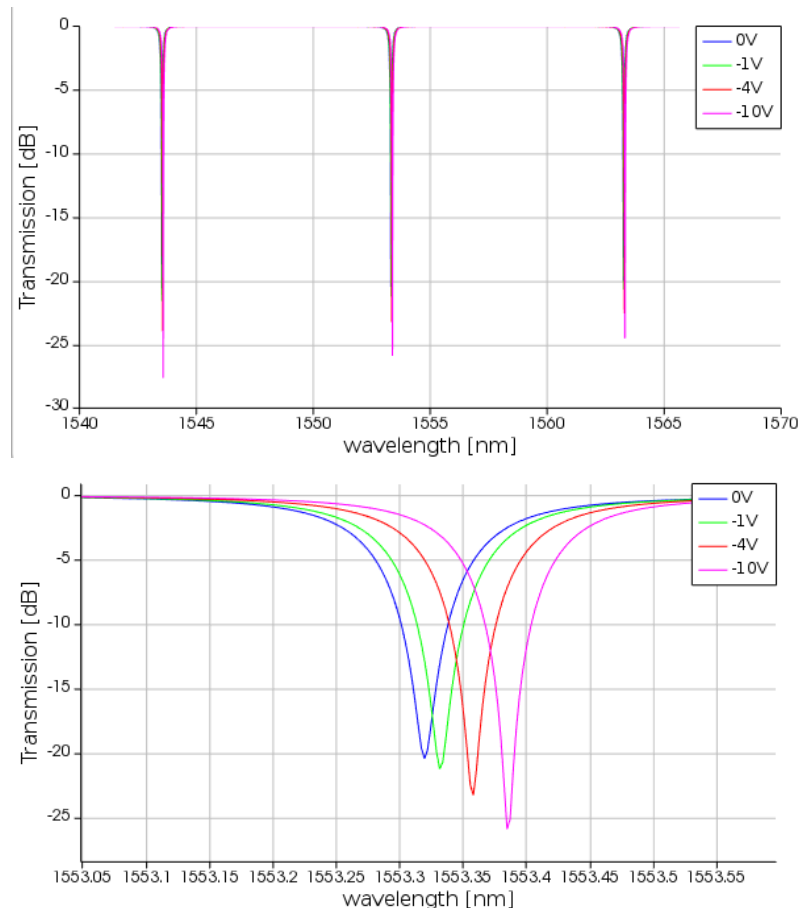
## 5. INTERCONNECT Compact Model



**Gambar 14 – Skematik Rangkaian Ring Modulator INTERCONNECT**

Gambar diatas adalah rangkaian ring modulator yang akan disimulasikan. Dengan menggunakan script **ring\_modulator\_active\_step5.lsf** akan didapatkan grafik berikut:





**Gambar 15 – Grafik Simulasi Script Tegangan Reverse Bias**

Hasil simulasi pada INTERCONNECT berikut adalah simulasi transmisi (dB) terhadap panjang gelombang (wavelength) di berbagai nilai tegangan reverse bias. Grafik akan membentuk respons filter notch dimana transmisi cahaya menurun drastis pada gelombang resonansi tertentu. Dapat diamati bahwa seiring dengan peningkatan magnitudo tegangan bias negatif dari 0V ke -1V, -4V, dan -10V, puncak resonansi (titik transmisi minimum) akan bergeser ke panjang gelombang yang lebih panjang. Tegangan reverse bias yang semakin tinggi akan menyebabkan deplesi pembawa muatan bebas di dalam waveguide cincin. Lembah terdalam terdapat pada tegangan reverse -10V, yaitu di sekitar -26 dB. Ketika cahaya berada jauh dari resonansi seperti di 1553.05 nm atau 1553.55 nm), transmisi untuk semua kurva mendekati 0 dB. Ini menunjukkan rugi-rugi penyisipan yang sangat rendah saat ring modulator berada dalam kondisi "ON".

Sehingga, akan dapat ditentukan tabel kebenaran dari rangkaian diatas berdasarkan input optik dan elektrik untuk logika gerbang **NAND ( $Y = \text{NOT } (A \text{ AND } B)$ )**. Akan definisikan besaran tegangan untuk input LOW (0) atau HIGH (1) = -4V untuk mencapai kondisi critical coupling dan off-resonance.

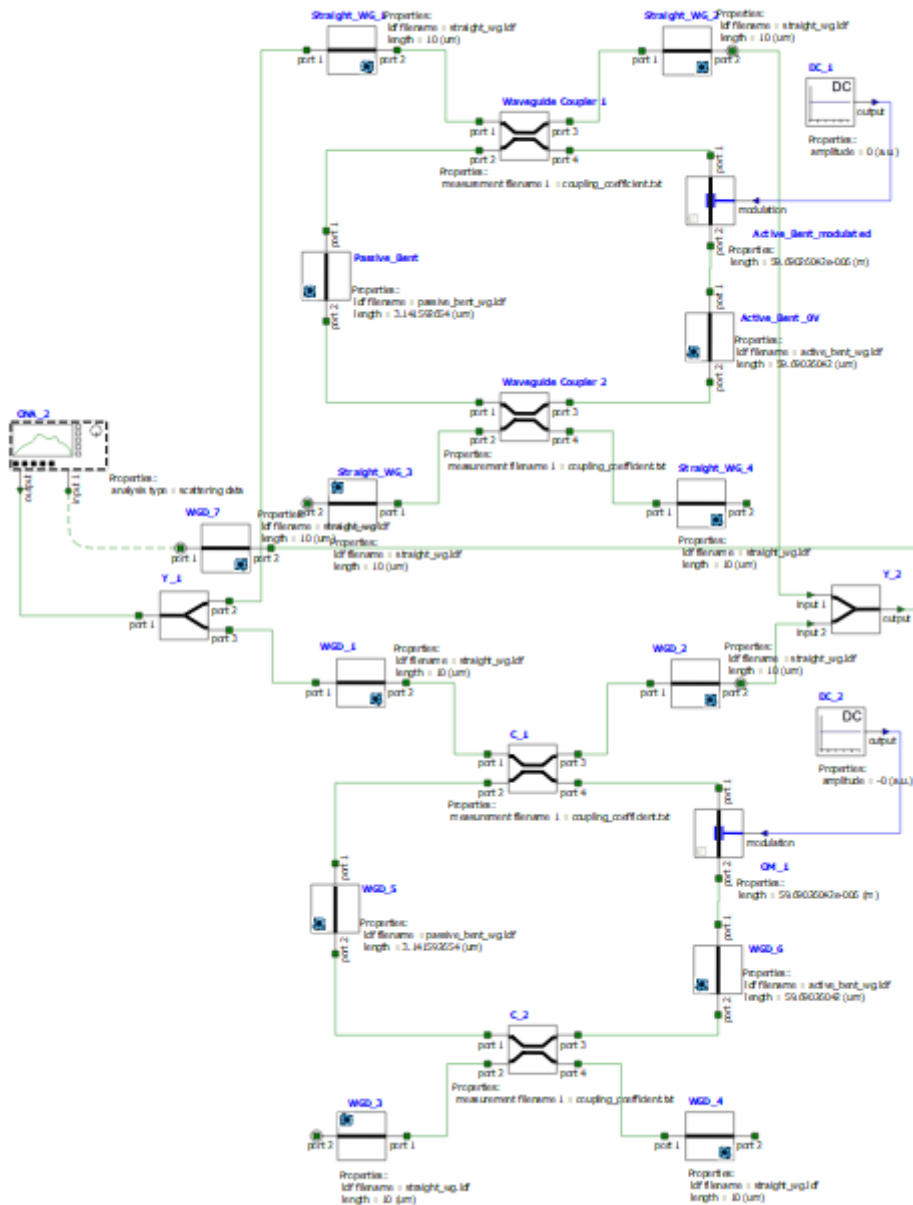
**Tabel 1 - Truth Table Teoritis Rangkaian Fotonik Gerbang Logika NAND**

A (Input)	B(Input)	Y (Output)	P (Daya)	
0	0	1	HIGH	Off-Resonance (Kedua Branch)
0	1	1	$\frac{1}{2}$ HIGH	Off -Resonance (Satu Branch)
1	0	1	$\frac{1}{2}$ HIGH	Off -Resonance (Satu Branch)

1	1	0	LOW	Critical Coupling
---	---	---	-----	-------------------

Dengan nilai tegangan reverse bias untuk logic “1” adalah -4V. Secara teoritis, besar daya pada input “01” dan “10” akan  $\frac{1}{2}$  dari daya input “00”. Hal ini terjadi karena hanya salah satu dari ring modulator yang bekerja, sehingga daya akan berkurang.

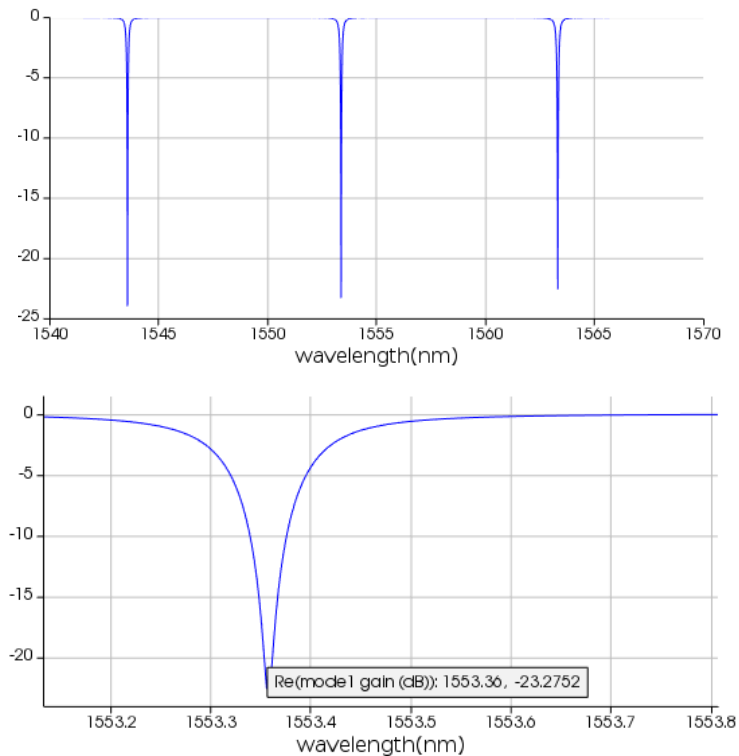
### Rangkaian Gerbang Logika NAND di Interconnect



Gambar 16 – Skematik Rangkaian Perancangan Gerbang Logika Fotonik OR INTERCONNECT

## Hasil Simulasi Gerbang Logika NAND:

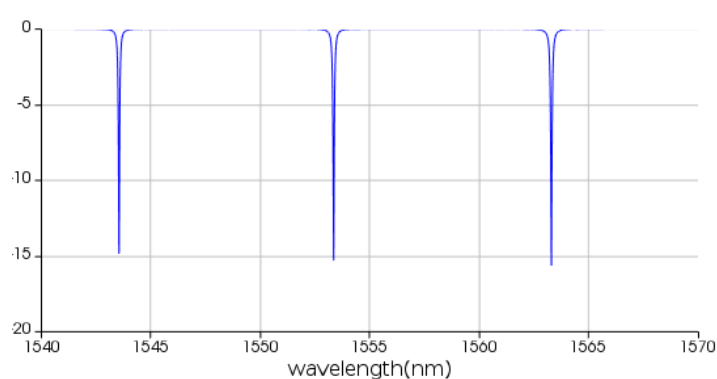
### a. (11) – Output LOW

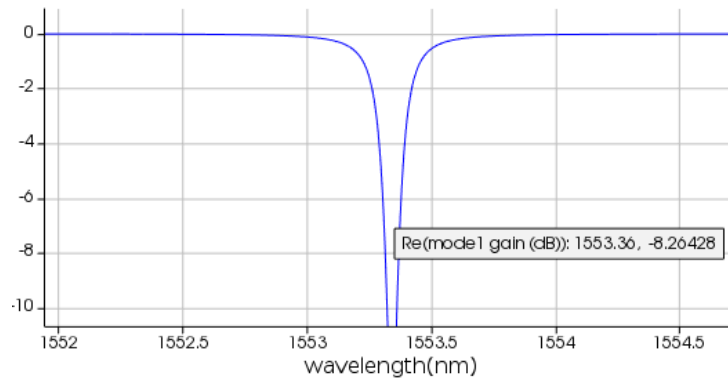


**Gambar 17 – Grafik Simulasi Input 11**

Hasil simulasi wavelength ini akan menjadi titik acuan atau panjang gelombang baseline untuk verifikasi keseluruhan fungsi gerbang NAND. Data tip pada grafik secara presisi mengidentifikasi bahwa transmisi minimum terjadi pada panjang gelombang 1553.36 nm dengan redaman daya sebesar -23.2752 dB. Panjang gelombang inilah yang dipilih sebagai panjang gelombang operasi tetap karena ini adalah satu-satunya kondisi (input "11") di mana gerbang NAND harus menghasilkan output "LOW" (logika 0). Dengan MENJADIKAN pengujian pada panjang gelombang ini sebagai patokan, setiap kondisi input lain (00, 01, 10) akan secara fisis menggeser resonansi menjauh dari titik 1553.36 nm.

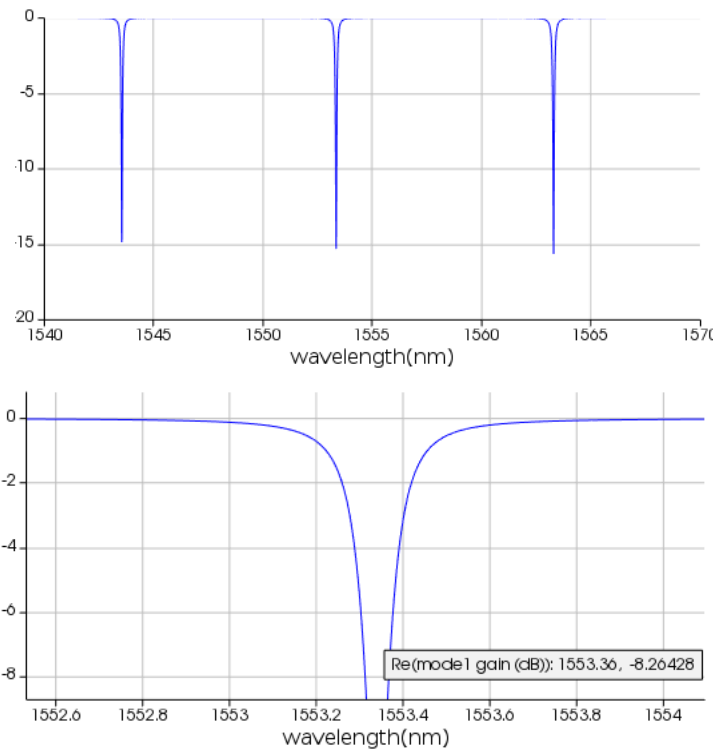
### b. (10) – Output HIGH





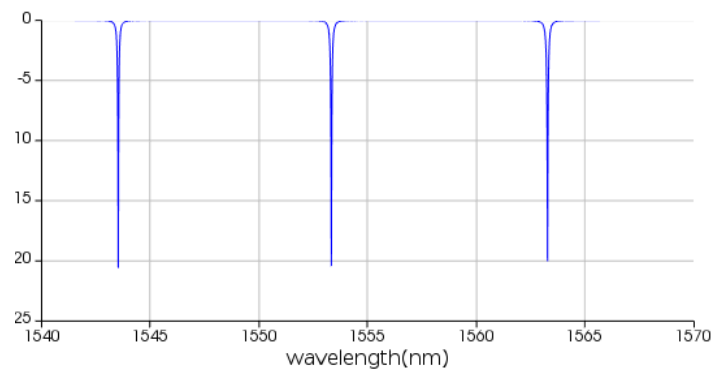
**Gambar 18 – Grafik Simulasi Input 10**

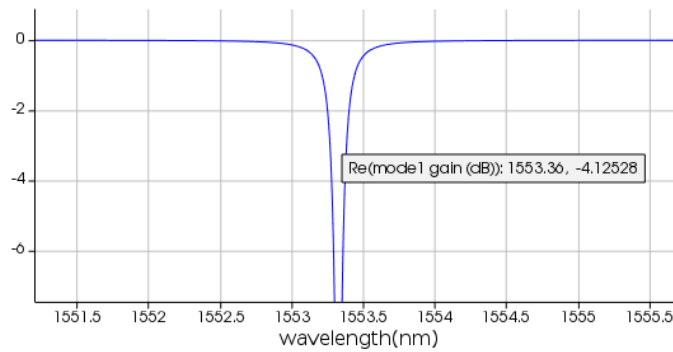
**c. (01) – Output HIGH**



**Gambar 19 – Grafik Simulasi Input 01**

**d. (00) – Output HIGH**





**Gambar 20 – Grafik Simulasi Input 00**

Dari grafik diatas akan didapatkan tabel kebenaran hasil simulasi gerbang NAND sebagai berikut.

**Tabel 2 - Truth Table Hasil Simulasi Rangkaian Fotonik Gerbang Logika NAND**

A (Input)	B(Input)	Y (Output)	Wavelength (nm)	Transmisi (dB)	
0	0	1	1553.36	-4.12528	Off - Resonance (Kedua Branch)
0	1	1	1553.36	-8.26428	Off - Resonance (Satu Branch)
1	0	1	1553.36	-8.26428	Off - Resonance (Satu Branch)
1	1	0	1553.36	-23.2752db	Critical Coupling

Transmisi daya adalah rasio daya optik yang keluar dari suatu komponen atau sistem terhadap daya optik yang masuk ke dalamnya

Rumusnya adalah:

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Ataupun dalam skala decibel (dB) akan ada rumus:

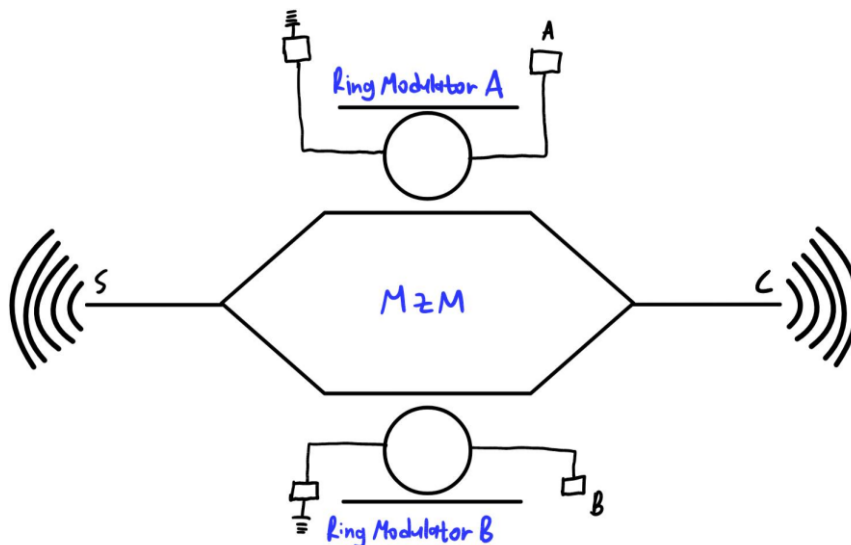
$$T_{db} = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Transmisi daya merupakan metrik fundamental yang mengukur efisiensi suatu komponen optik. Sebagaimana didefinisikan dalam rumus, transmisi dalam skala linear (T) adalah rasio antara daya optik keluaran ( $P_{out}$ ) terhadap daya optik masukan ( $P_{in}$ ), dengan rentang nilai dari 0 hingga 1. Untuk menangani rentang dinamis yang lebar dalam sistem optik, digunakan skala logaritmik desibel (dB), yang didefinisikan sebagai  $T_{dB} = 10 \log_{10}(P_{out}/P_{in})$ . Nilai dB yang negatif merepresentasikan adanya redaman atau rugi-rugi (loss). Sebagai referensi, nilai transmisi -3 dB setara dengan 50% daya yang ditransmisikan ( $T = 0.5$ ), sedangkan -10 dB setara dengan 10% daya yang ditransmisikan ( $T = 0.1$ ).

Analisis transmisi daya pada tabel hasil simulasi gerbang NAND menunjukkan fungsionalitas logika yang benar. Pada kondisi input (1,1), tercatat transmisi daya sangat rendah sebesar -23.27 dB, yang setara dengan hanya 0.47% daya input yang sampai ke output ( $T \approx 0.0047$ ). Penekanan sinyal yang kuat ini menghasilkan level logika "LOW" yang sangat jelas dan andal. Untuk kondisi input (0,0), di mana kedua lengan rangkaian bersifat transparan (Off-Resonance), transmisi daya mencapai nilai tertinggi di antara semua kondisi HIGH, yaitu -4.12 dB ( $T \approx 0.387$  atau 38.7%). Hal ini terjadi karena sinyal dari kedua lengan berinterferensi secara konstruktif pada keluaran.

Untuk kondisi input (0,1) dan (1,0), di mana hanya satu lengan yang aktif mentransmisikan daya, transmisi tercatat sebesar -8.26 dB ( $T \approx 0.149$  atau 14.9%). Berdasarkan hasil simulasi ini, perbandingan daya linear antara kondisi (0,1) dan (0,0) adalah  $0.149 / 0.387 \approx 0.385$ . Ini berarti daya pada kondisi (0,1) atau (1,0) adalah sekitar 38.5% dari daya pada kondisi (0,0) yaitu mendekati  $\frac{1}{2}$ . Meskipun level daya untuk ketiga kondisi HIGH tidak seragam, hal terpenting adalah semuanya secara signifikan lebih tinggi daripada level LOW, yang menjamin operasi gerbang NAND yang andal berkat Extinction Ratio yang tinggi.

#### Skematik Akhir Rangkaian (Termasuk Port Optic dan Elektrikal)



#### Referensi:

- <https://optics.ansys.com/hc/en-us/articles/360042322794-Ring-Modulator>
- <https://github.com/SiEPIC/SiEPICfab-EBeam-ZEP-PDK>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569441022000025>