

**PEMODELAN ARUS ELEKTRON TEROBOSAN PADA DIODA PERSAMBUNGAN  
P-N *BILAYER ARMCHAIR GRAPHENE NANORIBBONS* DENGAN  
MENGUNAKAN METODE MATRIKS TRANSFER**

**SKRIPSI**

diajukan untuk memenuhi sebagian syarat memperoleh gelar Sarjana Sains Program Studi  
Fisika Departemen Pendidikan Fisika



oleh

**INTAN ANJANINGSIH**

**NIM 1505007**

**PROGRAM STUDI FISIKA  
DEPARTEMEN PENDIDIKAN FISIKA  
FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA**

**2019**

**PEMODELAN ARUS ELEKTRON TEROBOSAN PADA DIODA  
PERSAMBUNGAN P-N *BILAYER ARMCHAIR GRAPHENE*  
*NANORIBBONS* DENGAN MENGGUNAKAN METODE MATRIKS  
TRANSFER**

Oleh  
**Intan Anjaningsih**

Sebuah skripsi yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Sains pada  
Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

© Intan Anjaningsih 2019  
Universitas Pendidikan Indonesia  
Mei 2019

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

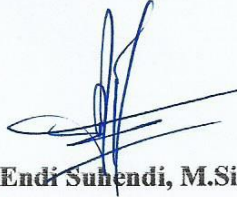
Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian,  
dengan dicetak ulang, difoto kopi, atau cara lainnya tanpa ijin dari penulis.

**INTAN ANJANINGSIH**

**PEMODELAN ARUS ELEKTRON TEROBOSAN PADA DIODA  
PERSAMBUNGAN P-N *BILAYER ARMCHAIR GRAPHENE*  
NANORIBBONS DENGAN MENGGUNAKAN METODE MATRIKS  
TRANSFER**

**disetujui dan disahkan oleh pembimbing:**

**Pembimbing I,**



**Dr. Endi Suhendi, M.Si.**

NIP. 19790501 200312 1 001

**Pembimbing II,**

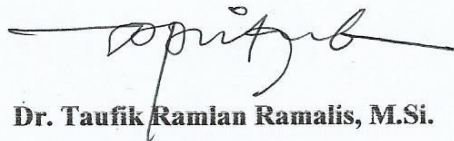


**Dr. Lilik Hasanah, M.Si.**

NIP. 197706162001122002

**Mengetahui,**

**Ketua Departemen Pendidikan Fisika**



**Dr. Taufik Ramian Ramalis, M.Si.**

NIP. 195904011986011001

## HALAMAN PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Pemodelan Arus Elektron Terobosan pada Dioda Persambungan P-N *Bilayer Armchair Graphene Nanoribbons* dengan Menggunakan Metode Matriks Transfer” benar-benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung resiko/sanksi apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya saya ini.

Bandung, Mei 2019

Yang membuat pernyataan,

Intan Anjaningsih

NIM. 1505007

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena hanya atas rahman dan rahim-Nya lah penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pemodelan Arus Elektron Terobosan pada Dioda Persambungan P-N *Bilayer Armchair Graphene Nanoribbons* dengan Menggunakan Metode Matriks Transfer”.

Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, kepada keluarganya, sahabat-sahabatnya, tabi'it tabi'in dan seluruh ummatnya yang selalu taat dan patuh pada ajarannya.

Penulis yakin bahwa penelitian ini tidak akan terlaksana tanpa adanya bimbingan dan arahan dari berbagai pihak. Begitu pula penulis menyadari sepenuhnya penulisan ini masih jauh dari kesempurnaan dikarenakan keterbatasan ilmu pengetahuan yang penulis miliki. Oleh karena itu saran maupun kritik yang sifatnya membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa yang akan datang.

Semoga penelitian ini dapat bermanfaat dan menambah wawasan, serta menjadi sumbangan yang cukup berarti bagi dunia ilmu pengetahuan. Semoga semua pihak yang telah memberikan bantuan apapun kepada penulis mendapatkan balasan yang terbaik dari Allah SWT.

Akhir kata semoga Allah SWT senantiasa membuka jalan bagi peningkatan kualitas ilmu pengetahuan dalam upaya mendapatkan ridho-Nya. Aamiin.

Bandung, Mei 2019

Penulis,

Intan Anjaningsih

NIM. 1505007

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena hanya atas rahman dan rahim-Nya lah penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis yakin skripsi ini tidak akan terwujud tanpa adanya do'a, bantuan, motivasi, arahan, dan bimbingan dari orang-orang terdekat. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Sumarja dan Ibu Aan Rohani selaku orang tua penulis yang telah mendidik, memberikan dukungan do'a dan motivasi terbaik bagi penulis serta mengajarkan arti berusaha dan bekerja keras.
2. Bapak Dr. Endi Suhendi, M.Si selaku pembimbing 1 penulis sudah banyak meluangkan waktu bagi penulis dalam memberikan arahan mengenai dunia penelitian.
3. Ibu Dr. Lilik Hasanah, M.Si selaku pembimbing 2 yang sudah banyak meluangkan waktu bagi penulis dalam memberikan arahan mengenai dunia penelitian.
4. Bapak Dr. Ahmad Aminudin, M.Si selaku pembimbing akademik penulis dan tim penelaah yang telah banyak bersabar dalam memberikan dorongan serta saran dan bimbingan selama studi di prodi Fisika dan arahan kepada penulis selama menjalani proses penelitian.
5. Semua dosen Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI yang telah mendidik dan memberikan ilmu pengetahuan kepada penulis.
6. Kakak-kakakku Neneng Aria Nengsih, Enda Firman dan Iing Maryaman yang telah memberikan dukungan moril maupun materil selama proses penulisan skripsi.
7. Kawan-kawanku Muhammad Fulki Fadhillah, Amelia Fadhillah dan Shofi Dhiya 'Ulhaq yang telah banyak berbagi ilmu pengetahuannya dalam melakukan penelitian ini.
8. Teman satu angkatan baik yang sudah lulus maupun yang masih dalam proses kelulusan bersama penulis yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Semoga semua yang telah diberikan kepada penulis menjadi berkah dan dibalas kebaikannya oleh Allah SWT. Aamiin.

**PEMODELAN ARUS ELEKTRON TEROBOSAN PADA DIODA  
PERSAMBUNGAN P-N *BILAYER ARMCHAIR GRAPHENE*  
NANORIBBONS DENGAN MENGGUNAKAN METODE MATRIKS  
TRANSFER**

Intan Anjaningsih

1505007

**ABSTRAK**

Telah dilakukan pemodelan arus elektron terobosan pada dioda persambungan P-N *bilayer armchair graphene nanoribbon* (BAGNR). Arus terobosan diperoleh dengan cara menyelesaikan persamaan Schrödinger tak bergantung waktu untuk menemukan transmitansi elektron melalui penghalang potensial dengan menggunakan metode matriks transfer (MMT). Arus elektron terobosan dihitung dengan beberapa variasi variabel yaitu lebar BAGNR, medan listrik dan suhu. Ditemukan bahwa arus terobosan meningkat dengan peningkatan tegangan panjar. Hasil ini karena ketika dioda diberi tegangan panjar, maka tinggi potensial penghalang akan memendek dan sebagai efeknya maka akan ada elektron yang menerobos dari daerah tipe-N ke daerah tipe-P melewati celah energi di daerah deplesi. Selanjutnya, arus elektron terobosan meningkat dengan semakin meningkatnya lebar BAGNR atau medan listrik yang diterapkan. Arus terobosan dioda persambungan P-N BAGNR yang dihasilkan dengan tegangan panjar 100mV adalah sekitar 4,8  $\mu\text{A}$  dengan  $F = 1 \text{ MV/cm}$ . Kemudian, hasil perhitungan arus terobosan BAGNR juga dibandingkan dengan *monolayer armchair graphene nanoribbons* (MAGNR). Dengan menggunakan BAGNR, arus terobosan yang dihasilkan tiga kali lebih besar daripada menggunakan MAGNR. Selain itu, Hasil arus terobosan dengan menggunakan MMT ini kemudian dibandingkan dengan metode WKB dan menunjukkan bahwa kedua metode ini menghasilkan nilai yang sama pada tegangan yang rendah dibawah 30 mV, sedangkan pada tegangan yang tinggi, MMT selalu memiliki nilai yang lebih tinggi.

Kata kunci: arus terobosan, dioda persambungan P-N, BAGNR, MMT



**MODELING OF TUNNELLING CURRENT OF ELECTRON IN  
BILAYER ARMCHAIR *GRAPHENE* NANORIBBONS P-N JUNCTION  
DIODE USING TRANSFER MATRIX METHOD**

Intan Anjaningsih

1505007

**ABSTRACT**

The tunnelling current in the P-N junction diode bilayer armchair graphene nanoribbons (BAGNR) has been calculated. The tunneling current are obtained by solving Schrödinger equation independently of time to find out the electron transmittance through a potential barrier by using transfer matrix method. The tunnelling current is calculated for various variable such as bias voltage, BAGNR width, electric field, and temperature. It is found that the tunnelling current increases with increasing the bias voltage. This result is because when the diode is given a bias voltage, the barrier potential will shorten and as an effect there will be electrons that tunnelling from the N-type region to P-type through the energy gap in the depletion area. Furthermore, the tunnelling current of electron increases with the increasing BAGNR width or the applied electric field and on the other hand, it decreases for increasing temperature. The tunnelling current of P-N junction diode BAGNR is generated with a bias voltage 100 mV is around 4,8  $\mu$ A with 1 MV/cm electric field. Then, the calculation of tunnelling current of BAGNR was also compared with monolayer armchair graphene nanoribbons (MAGNR). By using BAGNR, the result of tunnelling current is three times greater than using MAGNR. In addition, the tunnelling current using MMT is then compared with Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) method and shows that these two methods produce the same value at low voltage below 30 mV, while at high voltages, MMT always has a higher value.

Keyword: Tunnelling current, P-N junction diode, BAGNR, MMT.

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	2
HALAMAN PERNYATAAN .....	ii
KATA PENGANTAR .....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Batasan Masalah .....	5
1.4 Tujuan Penelitian .....	5
1.5 Manfaat Penelitian .....	6
1.6 Sistematika Penulisan .....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Struktur Kristal dan Sifat Elektronik <i>Monolayer Graphene</i> .....	9
2.1.1. Struktur Ruang Real ( <i>Real Space</i> ) .....	9
2.1.2. Kisi Resiprok <i>Graphene</i> .....	9
2.1.3. Metode <i>Tight Binding Monolayer Graphene</i> .....	10
2.2 Struktur dan Sifat Elektronik <i>Bilayer Graphene</i> .....	12
2.2.1. Struktur Pita Energi BAGNR.....	16
2.3 Semikonduktor .....	17

2.4	Dioda Persambungan P-N.....	18
2.3.1.	Struktur Pita Energi Sambungan P-N .....	20
2.3.2.	Profil Potensial Persambungan P-N.....	21
2.5	Perhitungan Koefisien Transmittansi dengan Metode Matriks Transfer .	24
2.6	Metode <i>Gauss Legendre Quadrature</i> .....	25
BAB III METODE PENELITIAN.....		27
3.1	Perhitungan Transmittansi .....	27
3.2	Perhitungan Arus Terobosan dengan MGLQ .....	29
3.3	Prosedur Penelitian .....	30
3.4	Alur Penelitian .....	31
BAB IV TEMUAN DAN PEMBAHASAN .....		33
4.1	Hasil Perhitungan Transmittansi Elektron pada Dioda Persambungan P-N BAGNR.....	33
4.2	Hasil Arus Terobosan terhadap Tegangan Panjar.....	37
4.2.1	Hasil Perhitungan Arus Terobosan terhadap Tegangan Panjar dengan Variasi N .....	39
4.2.2	Hasil Perhitungan Arus Terobosan terhadap Tegangan Panjar dengan Variasi Medan Listrik F .....	40
4.2.3	Hasil Perhitungan Arus Terobosan Terhadap Tegangan Panjar dengan Variasi Suhu .....	43
4.2.4	Hasil Perbandingan Arus Terobosan terhadap Tegangan Panjar pada BAGNR dan MAGNR.....	45
4.2.5	Hasil Perbandingan Arus Terobosan Terhadap Tegangan Panjar dengan Metode MMT dan WKB .....	47
BAB V SIMPULAN DAN SARAN .....		49
5.1	Simpulan .....	49
5.2	Rekomendasi.....	49

DAFTAR PUSTAKA .....	51
LAMPIRAN-LAMPIRAN.....	58
RIWAYAT HIDUP PENULIS .....	72

## DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1. Hasil perhitungn nilai $w$ , $d$ , $E_g$ dan arus terobosan dengan variasi nilai $N$ .....	39
Tabel 4. 2. Nilai $d$ terhadap $F$ .....	42
Tabel 4. 3.Pengaruh kopling interlayer pada massa efektif, celah energi dan kecepatan Fermi.....	47

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Struktur graphene ditunjukkan oleh gambar (a), (b) fullerene, (c) carbon nanotubes dan (d) graphite (Geim & Novoselov, 2007).....	8
Gambar 2. 2. Struktur kristal honeycomb monolayer graphene .....	9
Gambar 2. 3. Zona Brillouin .....	10
Gambar 2. 4. Struktur kisi graphene. ....	11
Gambar 2. 5. Struktur ikatan graphene (a) monolayer, (b) AB-stacked bilayer (W. Fang, Hsu, Song, & Kong, 2015). ....	12
Gambar 2. 6. Susunan atom pada AA-stacked.....	13
Gambar 2. 7. (a) Struktur kisi <i>bilayer</i> AB <i>graphene</i> dengan berbagai parameter lompatan energi elektronik berdasarkan model SWM (Slonczewski-Weiss-McClure), (b) zona <i>Brillouin</i> (Castro Neto dkk., 2009) yang diadaptasi dari (Malard dkk., 2007).....	14
Gambar 2. 8. Struktur atom BAGNR dengan AB-stacking (C. V Nguyen, Hieu, Nhan, Phuc, & Hieu, 2017).....	16
Gambar 2.9. Struktur pita energi semikonduktor tipe-P (kiri) dan semikonduktor tipe-N (kanan) (Suhandi & Tayubi, 2017).....	18
Gambar 2. 10. (a) Keadaan tepat saat terbentuk persambungan P-N, (b) difusi hole dan elektron melewati persambungan, dan (c) terbentuknya daerah deplesi pada persambungan P-N (Sze & Ng, 2007). ....	20
Gambar 2. 11. Struktur pita energi persambungan semikonduktor tipe-N dan tipe-P pada keadaan setimbang (Suhandi & Tayubi, 2017).....	21
Gambar 2. 12. (a) Profil Potensial Listrik persambungan P-N pada keadaan kesetimbangan termal, (b) profil potensial listrik persambungan P-N ketika diberi reverse biased, (c) model penghalang potensial dengan tinggi $E_g$ dan lebar $d$ . (Jena dkk, 2008; Yensen, Abdullah, & Khairurrijal, 2010). ....	21
Gambar 2. 13. Karakteristik I-V dioda tunneling .....	22
Gambar 2. 14. Profil potensial yang dibagi menjadi 2 bagian. ....	23

Gambar 2. 15. Profil potensial persambungan P-N BAGNR yang dibagi menjadi N segmen untuk digunakan dalam perhitungan koefisien transmisi dengan menggunakan MMT.....	24
Gambar 2. 16. Kurva hasil integral dengan batas -1 sampai 1 yang dihampiri dengan trapezium (Munir, 2006). .....	25
Gambar 3. 1. Model potensial penghalang dengan tinggi $E_g$ dan lebar $d$ . .....	27
Gambar 3. 2. Diagram alur penelitian. ....	31
Gambar 3. 3. Flowchart perhitungan arus terobosan. ....	32
Gambar 4. 1. Hasil perhitungan profil potensial dioda persambungan P-N BAGNR. ....	34
Gambar 4. 2. Transmisi elektron dioda persambungan P-N BAGNR. ....	35
Gambar 4. 3. Plot hasil perhitungan transmisi terhadap energi, dengan nilai $N=22, 28, 34$ dan $40$ pada suhu $T = 300$ K dan medan listrik $F = 1$ MV/cm .....	36
Gambar 4. 4. Plot hasil perhitungan arus terobosan terhadap tegangan panjar. ...	37
Gambar 4. 5. Plot hasil perhitungan arus terobosan terhadap beda potensial dengan variasi $N$ .....	40
Gambar 4. 6. Plot hasil perhitungan arus terobosan terhadap tegangan panjar dengan variasi medan listrik $F= 0,1$ MV/cm; $0,3$ MV/cm; $0,5$ MV/cm; dan $1$ MV/cm dan (a) $N= 40$ (b) $N=28$ .....	41
Gambar 4. 7. Plot hasil perhitungan arus terobosan terhadap tegangan panjar dengan suhu $T = 7, 77, 250, 300$ dan $500$ K.....	44
Gambar 4. 8. Plot perbandingan arus terobosan terhadap tegangan panjar untuk MAGNR dan BAGNR.....	46
Gambar 4. 9. Plot arus terobosan terhadap tegangan panjar dengan metode yang berbeda, $F = 0,1$ MV/cm. ....	48

## DAFTAR LAMPIRAN

### **Lampiran 1.**

Penurunan secara analitik perhitungan transmitansi

### **Lampiran 2.**

Kode sumber perhitungan transmitansi dalam bahasa pemrograman MATLAB

### **Lampiran 3.**

Kode sumber perhitungan arus terobosan BAGNR dengan MMT dalam bahasa pemrograman *Wolfram Mathematica*.

### **Lampiran 4.**

Kode sumber perhitungan arus terobosan BAGNR dengan metode WKB dalam bahasa pemrograman *Wolfram Mathematica*.

### **Lampiran 5.**

Kode sumber perhitungan arus terobosan MAGNR dengan MMT dalam bahasa pemrograman *Wolfram Mathematica*.