

KARAKTERISTIK TRANSISTOR EFEK MEDAN TEROBOSAN
MULTILAYER ARMCHAIR GRAPHENE NANORIBBON MELALUI ANALISIS
CUT-OFF FREQUENCY MENGGUNAKAN PENDEKATAN FUNGSI AIRY

SKRIPSI

diajukan untuk memenuhi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Fisika Kelompok Bidang Kajian Fisika Material



oleh

Taufik Syah Mauludin

NIM 1902827

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

2023

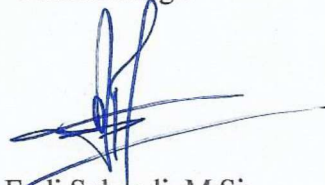
HALAMAN PENGESAHAN

TAUFIK SYAH MAULUDIN

KARAKTERISTIK TRANSISTOR EFEK MEDAN TEROBOSAN
MULTILAYER ARMCHAIR GRAPHENE NANORIBBON MELALUI ANALISIS
CUT-OFF FREQUENCY MENGGUNAKAN PENDEKATAN FUNGSI AIRY

disetujui dan disahkan oleh pembimbing:

Pembimbing I



Dr. Endi Suhendi, M.Si.

NIP. 197905012003121001

Pembimbing II

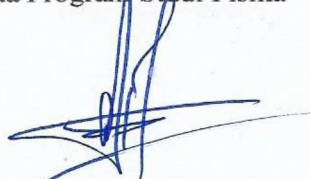


Dr. Dadi Rusdiana, M.Si.

NIP. 196810151994031002

Mengetahui

Ketua Program Studi Fisika



Dr. Endi Suhendi, M.Si.

NIP. 197905012003121001

**PERNYATAAN TENTANG KEASLIAN SKRIPSI DAN BEBAS
PLAGIARISME**

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi/tesis/disertasi dengan judul "Karakteristik Transistor Efek Medan Terobosan *Multilayer Armchair Graphene Nanoribbon* Melalui Analisis *Cut-Off Frequency* Menggunakan Pendekatan Fungsi Airy" ini beserta seluruh isinya adalah 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 risiko/sanksi apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya saya ini.

Bandung, Januari 2023

Taufik Syah Mauludin

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga skripsi dengan judul “Karakteristik Transistor Efek Medan Terobosan *Multilayer Armchair Graphene Nanoribbon* Melalui Analisis *Cut-off Frequency* Menggunakan Pendekatan Fungsi Airy” dapat diselesaikan. Penulisan skripsi ini dimaksudkan untuk memenuhi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Program Studi Fisika Kelompok Bidang Kajian Fisika Material.

Tersusunnya skripsi ini berkat partisipasi dukungan dan arahan dari berbagai pihak. Untuk itu, sepantasnyalah jika kepada penulis diberikan penghargaan yang setinggi-tingginya. Selanjutnya, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang terlibat baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga terwujudnya skripsi ini.

Penulis menyadari dalam skripsi ini terdapat banyak kelemahan dan kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran dari berbagai pihak untuk menyempurnakan skripsi ini sangat penulis nantikan. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi semua pembaca yang berkepentingan.

Bandung, Januari 2023

Taufik Syah Mauludin

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan. Tersusunnya skripsi ini berkat partisipasi dukungan dan arahan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan segala proses perkuliahan.
2. Orang tua yang telah mendidik dan memberikan dukungan dalam segala proses kehidupan.
3. Dr. Endi Suhendi, M.Si. sebagai Pembimbing I sekaligus Dosen Pembimbing Akademik dan Ketua Program Studi Fisika yang telah memberikan arahan, dukungan, dan menjadi orang tua dalam segala aktivitas perkuliahan.
4. Dr. Dadi Rusdiana, M.Si. sebagai Pembimbing II yang telah memberikan arahan dan masukan dalam penulisan skripsi.
5. Imelda Rara Rahmawati sebagai wakil yang selalu ada dalam proses perkuliahan dan pertemanan.
6. Proyek Duniawi, yaitu Mochamad Subarkah Ramadhani, Ihza Maessa Cahyadi, Thifal Nurrifqi Ariel Kurniawan, dan Abdul Azis yang selalu menemani dikala kesepian.
7. Poopita, yaitu Imelda Rara Rahmawati, Siti Maryam, Putri Ekarani, Annisa Turrahmah, Erlia Wiky Rohani Simatupang, Adelia Nurulswarna, Erni Nuraini, dan Fanny Maulida yang telah menjadi teman cerita selama menjalani perkuliahan.
8. Agustina Dwi Puspitasari dan Ila Karmila yang telah selalu mengingatkan dalam berbagai aspek kehidupan.
9. Yuni Rahmawati yang telah menjadi teman diskusi dalam berbagai mata kuliah.
10. Seraf Adonai Rafanelli Patai sebagai fasilitator Virtuclass.id Office yang selalu menjadi tempat diskusi dan bermain.

11. SSG (*Sobat Sensor Gas & Graphene*), yaitu Maulana Ibrohim dan Alta Ridho Anugrah yang telah menjadi teman penelitian skripsi.
 12. Teman-teman KBK Fisika Material yang selalu memberikan dukungan dan menjadi tempat diskusi dalam berbagai aspek perkuliahan.
 13. Arsa Ananta, yaitu teman-teman Fisika 2019 yang telah menjadi bagian dari pengalaman kehidupan yang sangat berharga.
 14. Akademik Rangers 20, yaitu Rahma Mutia, Hani Melyani, Raisa Najma Sakina, Yuni Rahmawati, Ihza Maessa Cahyadi, Putri Ekarani, dan Zulfa Fathi Arinalhaq yang telah memberikan pengalaman berharga selama berorganisasi.
 15. Hasan Sabili Rasyid, Naufal Al-Hakim, Ali Alfardhan, Gusti Andika Pratama, dan M. Furqon Iskandar Fatah sebagai kakak selama menjalani perkuliahan.
 16. Aldo Wista Fadhilah yang telah menjadi teman diskusi khususnya dalam pemecahan masalah instrumentasi.
 17. Azkia Mudrikah Almawaddah yang telah menemani keluh kesah sejak SMK hingga perkuliahan.
 18. Mantan kekasih yang menyebabkan penulis termotivasi untuk cepat lulus dan berkarir.
 19. Semua orang yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.
- Semoga Tuhan selalu memberikan kebaikan bagi kita semua.

**KARAKTERISTIK TRANSISTOR EFEK MEDAN TEROBOSAN
MULTILAYER ARMCHAIR GRAPHENE NANORIBBON MELALUI
ANALISIS CUT-OFF FREQUENCY MENGGUNAKAN PENDEKATAN
FUNGSI AIRY**

Taufik Syah Mauludin

Dr. Endi Suhendi, M.Si.

Dr. Dadi Rusdiana, M.Si.

ABSTRAK

Graphene nanoribbon dengan lebar celah pita energi yang dapat disesuaikan oleh lebarnya sangat menguntungkan untuk aplikasi *tunneling field-effect transistor* (TFET). *Graphene nanoribbon* merupakan material yang terbuat dari atom karbon yang tersusun secara heksagonal menyerupai sarang lebah dan memiliki lebar terbatas. *Cut-off frequency* sebagai karakteristik TFET menunjukkan bahwa transistor memiliki keuntungan dalam pengembangan perangkat dengan energi rendah dan frekuensi tinggi. Penelitian ini memodelkan *cut-off frequency* pada TFET *multilayer armchair graphene nanoribbon* (AGNR) menggunakan pendekatan fungsi Airy. Perhitungan diselesaikan secara numerik melalui komputasi pemrograman menggunakan Wolfram Mathematica. Profil potensial TFET dihitung menggunakan pendekatan fungsi Airy untuk menghasilkan transmitansi. Transmitansi digunakan untuk menentukan arus terobosan dari persamaan Landauer dengan bantuan metode Gauss-Legendre *quadrature*. Arus terobosan digunakan untuk menghitung *cut-off frequency*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *cut-off frequency* meningkat seiring meningkatnya tegangan *gate* hingga mencapai nilai maksimum lalu menurun kembali. Semakin meningkat tegangan *drain* dan ketebalan oksida, maka semakin meningkat pula nilai *cut-off frequency*. Sebaliknya, semakin meningkat panjang *channel*, lebar *multilayer graphene nanoribbon*, dan temperatur, maka semakin menurun nilai *cut-off frequency*. Perbedaan lapisan pada AGNR mempengaruhi performa perangkat TFET. *Trilayer* AGNR TFET menunjukkan hasil *cut-off frequency* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *bilayer* AGNR dan *monolayer* AGNR.

Kata Kunci: *Multilayer Armchair Graphene Nanoribbon*, Transistor Efek Medan Terobosan, Fungsi Airy, *Cut-off Frequency*

**CHARACTERISTICS OF FIELD EFFECT TRANSISTORS
MULTILAYER ARMCHAIR GRAPHENE NANORIBBON THROUGH
CUT-OFF FREQUENCY ANALYSIS USING AIRY FUNCTION
APPROACH**

Taufik Syah Mauludin

Dr. Endi Suhendi, M.Si.

Dr. Dadi Rusdiana, M.Si.

ABSTRACT

Graphene nanoribbon with a width-adjustable energy bandgap is very advantageous for tunneling field-effect transistor (TFET) applications. Graphene nanoribbon is a material made of carbon atoms arranged hexagonally resembling a honeycomb and has a limited width. The cut-off frequency as a TFET characteristic shows that the transistor has an advantage in developing low-energy and high-frequency devices. This study modeled the cut-off frequency of multilayer armchair graphene nanoribbon (AGNR) TFET using Airy function approach. Calculations are solved numerically through computational programming using Wolfram Mathematica. The TFET potential profile is calculated using Airy function approach to produce the transmittance. The transmittance is used to determine the tunneling current from the Landauer equation with the help of the Gauss-Legendre quadrature method. The tunneling current is used to calculate the cut-off frequency. The results show that the cut-off frequency increases with increasing gate voltage until it reaches a maximum value and then decreases again. As the drain voltage and oxide thickness increase, the cut-off frequency value also increases. Conversely, the increase in channel length, width of multilayer graphene nanoribbon, and temperature decrease the value of the cut-off frequency. Layer differences in AGNR affect the performance of TFET devices. The trilayer AGNR TFET shows a higher cut-off frequency than the bilayer AGNR and monolayer AGNR.

Keywords: Multilayer Armchair Graphene Nanoribbon, Tunneling Field-Effect Transistor, Airy Function, Cut-off Frequency

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN TENTANG KEASLIAN SKRIPSI DAN BEBAS PLAGIARISME.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Rumusan Masalah Penelitian	4
1.3 Batasan Masalah Penelitian.....	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Definisi Operasional.....	5
1.7 Struktur Organisasi Skripsi	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	6
2.1 <i>Graphene</i>	6
2.1.1 <i>Graphene Nanoribbon</i>	7
2.1.2 <i>Multilayer Graphene</i>	7
2.2 Transistor Efek Medan Terobosan.....	10
2.3 Fungsi Airy	13
2.4 <i>Cut-off Frequency</i>	13
BAB III METODE PENELITIAN.....	16
3.1 Prosedur Penelitian.....	16
3.2 Perhitungan Transmittansi.....	16
3.3 Perhitungan Arus Terobosan.....	17
3.4 Perhitungan <i>Cut-off Frequency</i>	17

BAB IV TEMUAN DAN PEMBAHASAN	19
4.1 Karakteristik Transmittansi Elektron	19
4.2 Karakteristik Arus Terobosan	20
4.3 Karakteristik <i>Cut-off Frequency</i>	23
4.3.1 Pengaruh Tegangan <i>Drain</i> Terhadap <i>Cut-off Frequency</i>	24
4.3.2 Pengaruh Panjang <i>Channel</i> Terhadap <i>Cut-off Frequency</i>	26
4.3.3 Pengaruh Tebal Lapisan Oksida Terhadap <i>Cut-off Frequency</i>	28
4.3.4 Pengaruh Lebar <i>Multilayer Armchair Graphene Nanoribbon</i> Terhadap <i>Cut-off Frequency</i>	30
4.3.5 Pengaruh Temperatur Terhadap <i>Cut-off Frequency</i>	31
BAB V SIMPULAN, IMPLIKASI, DAN REKOMENDASI	34
5.1 Simpulan	34
5.2 Implikasi.....	34
5.3 Rekomendasi	35
DAFTAR RUJUKAN	36
LAMPIRAN	44

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Energi dispersi dan celah pita energi <i>multilayer graphene nanoribbon</i> (Lee, 2014)	10
Tabel 4.1 Celah pita dan massa pembawa efektif <i>multilayer</i> AGNR	20
Tabel 4.2 Puncak <i>cut-off frequency</i> pada TFET <i>multilayer</i> AGNR.....	24
Tabel 4.3 Pengaruh tegangan <i>drain</i> terhadap puncak <i>cut-off frequency</i> pada TFET <i>multilayer</i> AGNR	25
Tabel 4.4 Pengaruh panjang <i>channel</i> terhadap puncak <i>cut-off frequency</i> TFET <i>multilayer</i> AGNR	27
Tabel 4.5 Pengaruh tebal lapisan oksida terhadap puncak <i>cut-off frequency</i> TFET <i>multilayer</i> AGNR	29
Tabel 4.6 Pengaruh lebar <i>multilayer</i> AGNR terhadap puncak <i>cut-off frequency</i> TFET <i>multilayer</i> AGNR	31
Tabel 4.7 Pengaruh temperatur terhadap puncak <i>cut-off frequency</i> TFET <i>multilayer</i> AGNR	33

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur kisi <i>graphene</i> dan (b) zona Brillouin (Castro Neto dkk., 2009)	6
Gambar 2.2 Struktur kisi (a) <i>armchair</i> dan (b) zig-zag GNR (Son dkk., 2006)	7
Gambar 2.3 Struktur atom (a) AA dan (b) AB <i>bilayer graphene</i> (Rozhkov dkk., 2016)	8
Gambar 2.4 Struktur atom (a) ABA dan (b) ABC <i>trilayer graphene</i> (Koshino, 2010)	9
Gambar 2.5 Struktur AGNR TFET (Bimo dkk., 2014)	10
Gambar 2.6 Diagram pita energi AGNR TFET saat (a) $V_g = 0$ dan (b) $V_g > 0$ (Chatterjee dkk., 2017).....	11
Gambar 2.7 Diagram pita energi AGNR TFET saat $V_g > 0$ (Bimo dkk., 2014)...	12
Gambar 2.8 Arus terobosan MOSFET dan TFET (Dharmireddy dkk., 2020)	14
Gambar 3.1 Diagram algoritma perhitungan <i>cut-off frequency</i>	18
Gambar 4.1 Transmittansi elektron pada TFET <i>multilayer</i> AGNR.....	19
Gambar 4.2 Arus terobosan terhadap tegangan <i>drain</i> pada TFET <i>multilayer</i> AGNR	20
Gambar 4.3 Arus terobosan terhadap tegangan <i>gate</i> pada TFET <i>multilayer</i> AGNR	21
Gambar 4.4 <i>Subthreshold swing</i> pada TFET <i>multilayer</i> AGNR	22
Gambar 4.5 <i>Cut-off frequency</i> terhadap tegangan <i>gate</i> pada TFET <i>multilayer</i> AGNR	23
Gambar 4.6 Pengaruh tegangan <i>drain</i> terhadap <i>cut-off frequency</i> TFET (a) <i>monolayer</i> (b) <i>bilayer</i> (c) <i>trilayer</i> AGNR.....	24
Gambar 4.7 Pengaruh panjang <i>channel</i> terhadap <i>cut-off frequency</i> TFET (a) <i>monolayer</i> (b) <i>bilayer</i> (c) <i>trilayer</i> AGNR.....	26
Gambar 4.8 Pengaruh tebal lapisan oksida terhadap <i>cut-off frequency</i> TFET (a) <i>monolayer</i> (b) <i>bilayer</i> (c) <i>trilayer</i> AGNR.....	28
Gambar 4.9 Pengaruh lebar <i>multilayer</i> AGNR terhadap <i>cut-off frequency</i> TFET (a) <i>monolayer</i> (b) <i>bilayer</i> (c) <i>trilayer</i> AGNR.....	30
Gambar 4.10 Pengaruh temperatur terhadap <i>cut-off frequency</i> TFET (a) <i>monolayer</i> (b) <i>bilayer</i> (c) <i>trilayer</i> AGNR.....	32

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Perhitungan Transmittansi.....	44
Lampiran 2.	Perhitungan Arus Terobosan.....	48
Lampiran 3.	Transmittansi.nb	49
Lampiran 4.	Arus Terobosan.nb	51
Lampiran 5.	<i>Cut-off Frequency</i> .nb.....	53