

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Penelitian

*International Technology Roadmap for Semiconductor* (ITRS) memperingatkan bahwa pengurangan ukuran skala dimensi horizontal pada transistor *complementary metal-oxide-semiconductor* (CMOS) telah mencapai batas dasar. ITRS menyarankan perluasan fungsionalitas CMOS untuk meningkatkan sistem elektronik (Graef, 2021). CMOS digunakan pada sebagian besar *chip* sirkuit *very large scale integrated* (VLSI). Istilah "VLSI" umumnya dikaitkan dengan *chip* yang mengandung ribuan atau jutaan *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor* (MOSFET) (Baker, 2010). Namun, MOSFET memiliki hambatan dalam kemampuannya untuk bekerja dalam daya yang sangat rendah. Dengan meminimalkan ukuran MOSFET, tegangan masukan harus diturunkan untuk mengurangi rapat daya (Woo Young Choi dkk., 2007).

Salah satu alternatif pengganti MOSFET dengan perangkat yang memiliki kecepatan tinggi, daya ultra rendah, dan hemat energi adalah *tunneling field-effect transistor* (TFET) (Tamak & Mehra, 2017). TFET merupakan perangkat elektronik semikonduktor yang cocok untuk aplikasi berdaya rendah. TFET telah dikembangkan oleh T. Baba pada tahun 1902. TFET menggunakan efek medan terobosan kuantum pada penghalang dibandingkan menggunakan efek emisi termionik pada MOSFET. TFET menunjukkan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan dengan CMOS (Avci dkk., 2015).

Perkembangan dalam memahami karakteristik TFET telah banyak dilakukan, khususnya mengenai *cut-off frequency*. *Cut-off frequency* merupakan salah satu parameter penting yang berguna untuk mempelajari perilaku frekuensi dan keterlambatan intrinsik pada transistor. Peningkatan *cut-off frequency* menyebabkan penundaan *switching* yang lebih kecil dan meningkatkan kinerja frekuensi tinggi dari perangkat TFET (Dash dkk., 2016). Pembawa muatan pada TFET memiliki mekanisme kerja didasarkan pada fenomena terobosan. Nilai arus terobosan pada TFET dapat mencapai nilai *subthreshold swing* di bawah 60 mV/dec pada temperatur kamar (Goel & Prakash, 2020). Terobosan dapat digambarkan sebagai fenomena di mana sebuah partikel dapat lolos dari penghalang potensial.

Nilai *cut-off frequency*, arus terobosan, dan transmitansi pada TFET menunjukkan bahwa transistor memiliki keuntungan dalam pengembangan perangkat dengan energi rendah dan frekuensi tinggi.

Material yang memiliki potensi lebih sebagai material baru penyusun komponen elektronik seperti transistor adalah *graphene*. Material *graphene* lebih unggul dibandingkan dengan bahan material lain yang sering digunakan seperti silikon. Mobilitas elektron pada *graphene* dapat mencapai lebih dari 200.000  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  (Bolotin dkk., 2008). *Graphene* merupakan material yang terbuat dari atom karbon yang tersusun secara heksagonal menyerupai sarang lebah. Selain menjadi bahan tertipis dan terkuat, struktur kisi sarang lebah 2D yang unik yang dimiliki *graphene* memberikan banyak keunggulan pada sifat fisika maupun sifat kimia (Castro Neto dkk., 2009). Sifat elektronik pada *graphene* merupakan sifat fisika yang paling dieksplorasi karena unik dan berbeda dari sistem materi terkondensasi lainnya.

Satu lapis atau *monolayer graphene* pertama kali dibuat secara mekanis dengan membelah material berlapis kuat seperti grafit yang disebut dengan metode *scotch tape*. Namun, metode tersebut merupakan metode yang rumit dan memakan waktu (Geim, 2009). Selain itu, *graphene* dapat ditumbuhkan secara epitaksi oleh *chemical vapour deposition* (CVD) hidrokarbon pada substrat logam (Geim & Novoselov, 2007). Meskipun bahan yang dihasilkan adalah *graphene* dengan beberapa lapis atau *multilayer*, namun *multilayer graphene* tetap mempertahankan banyak sifat menarik dari *monolayer graphene* (Novoselov dkk., 2012). Ketika lapisan *graphene* ditumpuk, struktur elektronik yang khas akan muncul bergantung pada jumlah lapisan dan urutan susunannya (Mak dkk., 2010). Susunan tumpukan yang paling umum yaitu susunan AB atau *bernal-stacked* dan *rhombohedral-stacked* (Paul Nery dkk., 2021).

*Graphene* yang memiliki lebar terbatas dinamakan *graphene nanoribbon* (GNR). GNR dengan lebar lebih kecil dari 10 nm menunjukkan operasi transistor pada suhu ruang dengan kecepatan *switching* yang sangat baik dan mobilitas pembawa muatan yang tinggi (Li dkk., 2008). Berdasarkan jenis tepi, GNR terbagi menjadi dua jenis, yaitu tepi zig-zag (ZGNR) dan tepi *armchair* (AGNR).

Perhitungan *tight-binding* menunjukkan bahwa ZGNR bersifat logam dan AGNR dapat bersifat semikonduktor atau logam (Liang dkk., 2007).

GNR dengan lebar celah pita energi yang dapat disesuaikan oleh lebarnya sangat menguntungkan untuk aplikasi TFET. TFET GNR memperoleh manfaat dari sifat material dan mekanisme terobosan sehingga dapat mencapai kecepatan tinggi dan disipasi daya yang rendah (Zhang dkk., 2008). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kapasitansi kuantum GNR lebih kecil dibandingkan dengan *graphene* yang menyebabkan *switching* dan respon frekuensi yang lebih baik (Ghobadi & Pourfath, 2014). Penggunaan *graphene* akan meningkatkan *cut-off frequency* dibandingkan semikonduktor silikon biasa (Lin dkk., 2009). Penelitian lainnya menunjukkan bahwa *multilayer* GNR/FET secara signifikan dapat mengungguli *carbon nanotube* (CNT) karena konstanta dielektrik tinggi yang tipis dan kopling *interlayer* yang berkurang.

Penelitian mengenai simulasi mengenai karakteristik TFET GNR telah banyak dilakukan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *multilayer* GNR dengan kopling *interlayer* yang lemah adalah kandidat terbaik untuk GNR/FET dengan performa tinggi (Ouyang dkk., 2010). Selain itu, simulasi secara numerik telah dilakukan dengan memasukkan daerah yang didoping ringan antara *drain* dan *channel* pada GNR TFET menunjukkan arus *off*  $10^2$ - $10^3$  kali lebih kecil, rasio *on/off* hingga  $10^5$  kali lebih besar, waktu tunda yang lebih pendek, *power-delay product* (PDP) yang lebih kecil dan *drain-induced barrier thinning* (DIBT) yang lebih sedikit (Ghoreishi dkk., 2014). Penelitian mengenai simulasi diharapkan dapat memberikan informasi karakteristik TFET GNR untuk mengoptimalkan performa perangkat elektronik sebelum diproduksi dalam skala besar.

Penelitian ini akan memodelkan *cut-off frequency* pada TFET *multilayer* AGNR dengan pendekatan fungsi Airy untuk melihat karakteristik TFET *multilayer* AGNR yaitu *monolayer* (MAGNR), *bilayer* (BAGNR), dan *trilayer* (TAGNR) berdasarkan parameter-parameter yang mempengaruhinya. Fungsi Airy diaplikasikan untuk menyelesaikan persamaan Schrödinger pada TFET. Fungsi Airy dapat mempertahankan tingkat keakuratan yang baik dibandingkan dengan metode aproksimasi Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) (Smith & Baghai-Wadji,

2008). Terdapat perbedaan pada perhitungan probabilitas terobosan yang cukup besar untuk energi yang rendah (Oktasendra, 2016).

## 1.2 Rumusan Masalah Penelitian

Berdasarkan latar belakang penelitian di atas, rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik transmitansi elektron pada TFET MAGNR, BAGNR, dan TAGNR dengan pendekatan fungsi Airy?
2. Bagaimana karakteristik arus terobosan pada TFET MAGNR, BAGNR, dan TAGNR?
3. Bagaimana karakteristik *cut-off frequency* pada TFET MAGNR, BAGNR, dan TAGNR karena pengaruh tegangan *drain*, panjang *channel*, tebal lapisan oksida, lebar *multilayer* AGNR, dan temperatur?

## 1.3 Batasan Masalah Penelitian

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah *monolayer armchair graphene nanoribbon*, *bilayer armchair graphene nanoribbon*, dan *trilayer armchair graphene nanoribbon*.
2. Transmitansi elektron dihitung dengan batas rentang energi sebesar 0,0 hingga 1,0 eV.
3. Arus terobosan dihitung dengan batas rentang tegangan *gate* dan tegangan *drain* sebesar 0,0 hingga 0,2 V.
4. *Cut-off frequency* dihitung dengan batas rentang tegangan *gate* sebesar 0,0 hingga 0,2 V.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik transmitansi elektron pada TFET MAGNR, BAGNR, dan TAGNR dengan pendekatan fungsi Airy.
2. Mengetahui karakteristik arus terobosan pada TFET MAGNR, BAGNR, dan TAGNR.
3. Mengetahui karakteristik *cut-off frequency* pada TFET MAGNR, BAGNR, dan TAGNR karena pengaruh tegangan *drain*, panjang *channel*, tebal lapisan oksida, lebar *multilayer* AGNR, dan temperatur.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan informasi mengenai karakteristik TFET *multilayer* AGNR sehingga diharapkan dapat menjadi rujukan untuk perkembangan teknologi *graphene* sebagai bahan alternatif pembuatan semikonduktor dan perkembangan teknologi transistor di masa yang akan datang.

## 1.6 Definisi Operasional

Karakteristik transistor efek medan terobosan (TFET) yang dimaksudkan pada penelitian ini adalah sifat khas yang dimiliki oleh TFET. Karakteristik TFET ditinjau dari transmitansi, arus terobosan, dan *cut-off frequency*. Transmitansi menunjukkan probabilitas elektron untuk menembus penghalang potensial. Arus terobosan menunjukkan elektron bergerak melalui penghalang potensial. Material yang digunakan pada TFET adalah MAGNR, BAGNR, dan TAGNR.

Analisis *cut-off frequency* yang dimaksudkan pada penelitian ini adalah penyelidikan terhadap suatu peristiwa yang terjadi pada TFET untuk mengetahui keadaan yang sebenarnya. Nilai *cut-off frequency* akan divariasikan berdasarkan tegangan *drain*, panjang *channel*, tebal lapisan oksida, lebar *multilayer* AGNR, dan temperatur.

## 1.7 Struktur Organisasi Skripsi

Skripsi ini terdiri atas lima bab dimulai dari Bab I Pendahuluan yang memaparkan latar belakang penelitian, rumusan masalah penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan struktur organisasi skripsi. Bab II Kajian Pustaka memberikan pembahasan mengenai *graphene*, TFET, fungsi Airy, dan perhitungan *cut-off frequency* pada TFET *multilayer* AGNR. BAB III Metode Penelitian menyajikan metode yang digunakan untuk pemodelan *cut-off frequency* TFET *multilayer* AGNR. BAB IV Temuan dan Pembahasan menyampaikan hasil pemodelan dan pembahasan karakteristik *cut-off frequency* TFET *multilayer* AGNR. BAB V Simpulan, Implikasi, dan Rekomendasi menyajikan simpulan hasil penelitian ini serta implikasi dan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya mengenai karakteristik TFET *multilayer* AGNR.