

Prediksi Transport Kuantum yang Dipengaruhi Oleh Keberadaan *Double Finger Gates* yang Dialiri Arus AC

*Moh. Erlangga Aditya Rifandi, **Joga Dharma Setiawan², Rifky Ismail²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: avan.rifandi@gmail.com; **E-mail: joga.setiawan@ft.undip.ac.id

Abstrak

Penelitian analisis numerik dilakukan pada transportasi kuantum dalam struktur gerbang split tipe-N dengan adanya perangkat *AC Double Finger Gates*. Konduktansi kuantum dihitung untuk tiga parameter yang berbeda untuk melihat efek dari masing-masing parameter terhadap konduktansi kuantum. Efek amplitudo energi potensial (U_d), jarak antara dua *Finger Gate* (d), dan parameter pengikat (ω_y) dihitung. Hasilnya menunjukkan bahwa setiap parameter mempengaruhi hasil konduktansi kuantum, dan berbagai *Quasi-Bond States* (QBS) terbentuk. Amplitudo energi potensial (U_d), dan jarak antara dua gerbang jari (d) secara relatif mempengaruhi jumlah transmisi resonansi elektron dan reflektansi resonansi elektron. Selain itu, parameter pengikat (ω_y) mempengaruhi berapa banyak QBS yang terbentuk, semakin rendah nilai parameter pengikat (ω_y), semakin banyak QBS yang terbentuk. Analisis teoritis yang dilakukan dalam penulisan ini akan memberikan instruksi awal untuk desain perangkat yang dikendalikan oleh gerbang tipe-N dengan adanya perangkat *AC Double Finger Gates*, yang dapat digunakan dalam industri semikonduktor.

Kata kunci: *double finger gate*; perangkat gerbang split; tipe-n; transport kuantum

Abstract

A numerical analysis research is performed on the quantum transport in an n-type split-gate structure in a presence of an AC double-finger gate device. The quantum conductance is calculated for three different parameters to see the effect of each parameter towards the quantum conductance. The effect of potential energy amplitude (U_d), the distance between the two finger gates (d), and confining parameter (ω_y) are being calculated. The results show that every parameter affected the quantum conductance result, and various quasi-bound states (QBSs) are formed. The potential energy amplitude (U_d), and the distance between the two finger gates (d) affect relatively on the amount of electron resonance transmission and electron resonance reflectance. Additionally, the confining parameter (ω_y) affects how many QBSs are formed, the lower value of confining parameter (ω_y), the more QBSs are formed. The theoretical analysis performed in this paper will give early instruction for the design of n-type gate-controlled devices in a presence of an AC double-finger gate, which can be used for the semiconductor industry.

Keywords: double finger gates; n-type; quantum transport; split gate device

1. Pendahuluan

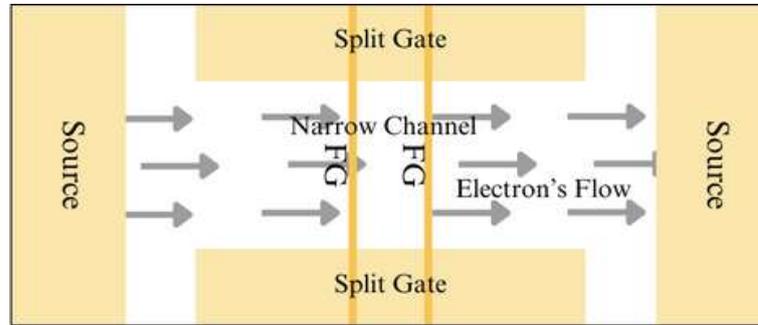
Dewasa ini, fenomena transport kuantum telah menarik perhatian banyak peneliti [1]–[4]. Pada awalnya, fenomena transportasi kuantum merujuk pada perilaku elektron atau pembawa muatan lainnya dalam suatu sistem pada skala kuantum, di mana sifat gelombang mereka menjadi signifikan. Hal ini dapat menghasilkan berbagai fenomena menarik, seperti interferensi kuantum, terowongan kuantum, dan kuantisasi konduktans [5]. Seperti yang dinyatakan oleh Beenakker dan Houten, studi tentang transportasi kuantum menjadi lebih mudah dengan memeriksa perilaku transport kuantum di dalam *two-dimensional electron gas* (2DEG) karena kombinasi yang menguntungkan antara panjang gelombang Fermi yang signifikan dan panjang bebas rata-rata yang substansial [6].

Tang dkk. [7] melakukan salah satu penelitian awal dalam bidang ini dengan menguji konduktansi kuantum struktur gerbang tunggal ACFG dan ACTG menggunakan spektroskopi konduktansi *sideband* aktif. Percobaan ini mengungkapkan bahwa jumlah *sideband* dibatasi hingga $MS \leq 3$, dan *Quasi-Bond States* (QBS) tetap tidak berubah tanpa tegangan gerbang AC yang kuat. Namun, penelitian tersebut dilakukan hanya dengan keberadaan *single finger*

gate. Kemudian, Chen dkk. [8] menyelidiki transportasi kuantum dalam perangkat *narrow channel* tipe-p dengan *double finger gates* yang dibebani arus DC. Studi ini mengamati perilaku resonansi dalam transportasi kuantum ketika *finger gate* menginduksi efek modulasi energi potensial yang signifikan. Prediksi analitis berdasarkan perkiraan *quantum well* (QW) persegi yang resonan menunjukkan pembentukan puncak konduktansi pada energi tertentu. Dengan menggunakan penelitian sebelumnya yang dibahas dalam makalah ini, dalam penelitian ini, dengan tujuan untuk melengkapi studi tersebut, fenomena transportasi kuantum pada saluran kuantum gerbang terpisah dalam *two-dimensional electron gas* (2DEG) dengan keberadaan struktur *double finger gate* yang dilalui arus AC (ACDFG) dianalisis dan dibahas dalam makalah ini.

2. Dasar Teori

2.1 Model Teoritis



Gambar 1. representasi visual tampilan atas untuk mengilustrasikan aliran elektron dari *source* ke *drain* melalui *narrow channel* yang disebabkan oleh adanya *split gate* pada 2DEG. *Double finger gates* yang dialiri arus AC berada di atas gerbang terpisah tersebut.

Gambar 1 mengilustrasikan struktur perangkat tipe-n yang dikontrol oleh *gate*. Perangkat ini terdiri dari *split gate* (SG) yang berfungsi sebagai pembuat saluran kuantum sempit atau *narrow channel*, serta dua *finger gate* yang dilalui arus AC. Kedua *finger gate* tersebut berfungsi untuk mengatur panjang *gate*, yang akhirnya mengatur *scattering region* yang tercipta diantara kedua *finger gate*. Dalam struktur tersebut, elektron mengalir dari *source* ke *drain*. Elektron ini mengalir pada 2DEG di mana terdapat dua *split gate* yang menciptakan *narrow channel* bagi elektron untuk bergerak [9]. Keberadaan perangkat *double finger gates* yang ditenagai oleh AC memungkinkan amplitudo energi potensialnya dikontrol dan dimanipulasi. *Double finger gates* juga menciptakan apa yang disebut sebagai *scattering region* yang terletak di antara kedua *finger gate* [10]. Ketika elektron mencapai *finger gate*, ia mengeluarkan tiga bentuk energi, yaitu energi insiden, energi tertransmisikan, dan energi pantulan. Energi insiden didefinisikan sebagai $e^{ik_n x} e^{-i(\mu+m\omega)t}$, energi tertransmisikan didefinisikan sebagai $t_n^m e^{ik_n^m x} e^{-i(\mu+m\omega)t}$, dan energi pantulan didefinisikan sebagai $r_n^m e^{-ik_n^m x} e^{-i(\mu+m\omega)t}$ [11].

Lebar *channel* kuantum diatur oleh struktur *split gate*, dengan menggunakan unit energi yang spesifik, dinotasikan sebagai, $E^* = \hbar^2 k_F^2 / 2m^*$, lebar $a^* = 1/k_F$, waktu $t^* = \hbar / E^*$, persamaan Schrödinger tanpa dimensi yang menyatakan transport kuantum yang dipengaruhi oleh arus AC adalah

$$\left[\hat{K} + U(x, y, t) \right] \Psi(x, y, t) = i \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, y, t) \quad (1)$$

dimana \hat{K} adalah energi kinetik yang dimiliki oleh elektron di 2DEG dan $U(x, y, t)$ adalah energi potensial, termasuk potensial kedua *split gate*, $U_G(x, t)$. Energi fermi dan lebar gelombang fermi dibuat menjadi unit dan dapat didefinisikan sebagai $\hbar = 2m_e = 1$. Sehingga, persamaan Schrödinger untuk sistem ACFG adalah

$$\left[-\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \omega_y^2 y^2 + U_d \delta(x) \cos \omega t \right] \Psi(x, y, t) = i \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, y, t) \quad (2)$$

Pada studi baru-baru ini, $U_G(x, t)$ merujuk pada ACFG dikarenakan riset ini berfokus pada perilaku ACFG. Dimana potensial *time-dependent gate* untuk ACFG didefinisikan sebagai $U_{FG} = U_d \delta(x) \cos \omega t$ dimana U_d , ω , dan ω_y adalah amplitudo energi potensial ACFG, frekuensi angular, dan parameter *confining* secara berurutan. Fungsi total gelombang elektron didefinisikan sebagai $\Psi(x, y, t) = \sum_{i=1}^{N_s} \phi_n(y) \psi_n(x, t)$, dimana n dan $\phi_n(y)$ adalah indeks *subband* dan *transverse eigenfunction*, secara berurutan. N_s menunjukkan jumlah *subband* yang terisi, $\psi_n(x, t)$ adalah fungsi gelombang elektron pada *subband* ke- n disepanjang arah transport dan termasuk gelombang masuk $\psi_n^{\text{inc}}(x, t) = e^{ik_n x} e^{-i\mu t}$, gelombang transmisi $\psi_n^{\text{tran}}(x, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} t_n^m e^{ik_n^m x} e^{-i(\mu+m\omega)t}$, dan gelombang pantulan

$\psi_n^{\text{ref}}(x, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} r_n^m e^{-ik_n^m x} e^{-i(\mu+m\omega)t}$, dimana t_n^m dan r_n^m adalah amplitudo transmisi dan pantulan elektron yang mengisi *subband* n dan *sideband* m dengan nomor gelombang k_n^m , secara berurutan.

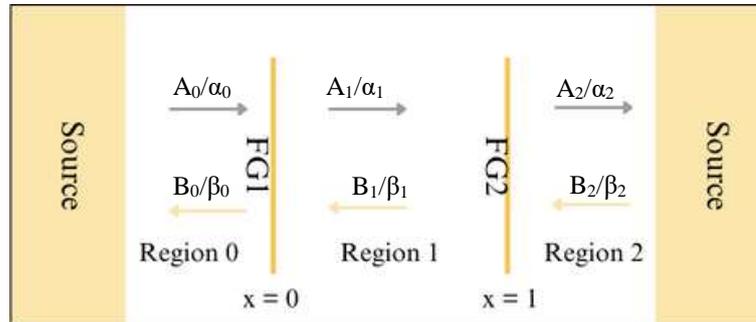
Untuk mencari persamaan kuantum dinamis untuk struktur ACFG, persamaan (2) diturunkan dengan menggunakan dua *boundary condition* untuk fungsi gelombang. Dengan mengeliminasi faktor waktu $e^{-i(\mu+m\omega)t}$, dan mendapatkan penurunan pertama dari fungsi bentuk gelombang yang kontinu pada $x=0$, persamaan kuantum dinamis dapat didefinisikan sebagai

$$k_n^m t_n^m + \frac{iU_d}{4} [\delta_{m,m'-1} t_n^{m+1} + \delta_{m,m'+1} t_n^{m-1}] = k_n^m \delta_{m0} \quad (3)$$

dimana δ adalah fungsi delta Kronecker.

Probabilitas transmisi *subband* didefinisikan sebagai $T_n = \sum_{m=-M_s}^{M_s} T_n^m$, dimana $T_n^m = \text{Re}(k_n^m) |t_n^m|^2 / k_n$, adalah probabilitas transmisi *single-mode* dari elektron yang memasuki *drain* di dalam mode (n,m) . Secara bersamaan, probabilitas pantulan *subband* didefinisikan sebagai $R_n = \sum_{m=-M_s}^{M_s} R_n^m$, dimana $R_n^m = \text{Re}(k_n^m) |r_n^m|^2 / k_n$, adalah probabilitas pantulan *single-mode* dari elektron yang memasuki *drain* di dalam mode (n,m) . Terakhir, konduktansi *sideband* mempunyai bentuk $G^m = 2e^2 / h \sum_{n=1}^{N_T} T_n^m$, dimana $2e^2 / h$ adalah konduktansi kuantum dan N_T adalah total jumlah mode propagasi.

2.2 Scattering Matrix



Gambar 2. Ilustrasi dari *scattering matrix region* yang terdapat pada perangkat AC-Double Finger Gates

Gambar 2 menunjukkan adanya dua struktur *finger gate*, satu berlokasi di $x = 0$, dan yang lainnya berlokasi di $x = a$, di mana jarak antara kedua *finger gate* tersebut didefinisikan sebagai d . *Scattering matrix* terbentuk di antara setiap gerbang jari. Pada struktur *scattering matrix*, terdapat tiga wilayah, yaitu wilayah 0 yang terletak di antara *source* dan *finger gate* pertama, wilayah 1 yang terletak di antara *finger gate* pertama dan kedua, dan wilayah 2 yang terletak di antara *finger gate* kedua dan *drain*. *Scattering matrix* pertama dibentuk di *finger gate* pertama, di mana gelombang bergerak dari wilayah 0 ke wilayah 1, dan *scattering matrix* kedua dibentuk di gerbang jari kedua, di mana gelombang bergerak dari wilayah 1 ke wilayah 2.

Merujuk pada Gambar 2, parameter insiden diberi label A untuk parameter yang bergerak ke kiri, dan B untuk parameter yang bergerak ke kanan. Untuk gelombang pertama pada *finger gate* pertama yang bergerak dari wilayah 0 ke wilayah 1, gelombang masuk dicatat sebagai A_0 , dengan *sideband* yang dicatat sebagai α_0 , kemudian gelombang keluar dicatat sebagai A_1 dengan *sideband* yang dicatat sebagai α_1 . Demikian pula, gelombang untuk *finger gate* kedua yang bergerak dari wilayah 1 ke wilayah 2, gelombang masuk dicatat sebagai A_1 dengan *sideband* yang dicatat sebagai α_1 , dan gelombang keluar dicatat sebagai A_2 dengan *sideband* yang dicatat sebagai α_2 .

Scattering matrix untuk setiap *finger gate* bernilai sama, dengan persamaan yang dapat didefinisikan sebagai

$$\begin{bmatrix} A_{j+1} \\ B_j \end{bmatrix} = S(j, j+1) \begin{bmatrix} A_j \\ B_{j+1} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} t_{\alpha_{j+1}, \alpha_j} & \tilde{r}_{\alpha_{j+1}, \beta_{j+1}} \\ r_{\beta_j, \alpha_j} & \tilde{t}_{\beta_j, \beta_{j+1}} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} A_j \\ B_{j+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dengan menurunkan persamaan (2) dan (3), persamaan akhir untuk probabilitas transmisi dari sistem *double finger gate* didefinisikan sebagai, $T_n(\alpha_2, \alpha_0) = k_n(\alpha_2) / k_n(\alpha_0) |t_{\alpha_2, \alpha_0}|^2$, dan total konduktansi didefinisikan sebagai $G = 2e^2 / h \sum_{\alpha_0} \sum_{\alpha_2} \sum_n T_n(\alpha_2, \alpha_0)$, dimana T_n , α , β , k_n , t , G , dan $2e^2 / h$ adalah probabilitas transmisi, *sideband* yang bergerak ke kanan, *sideband* yang bergerak ke kiri, vektor gelombang, koefisien transmisi, total konduktansi, dan konduktansi kuantum secara berurutan.

3. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian riset ini adalah dengan menggunakan analisis numerik secara penuh tanpa adanya eksperimen. Efek dari total energi konduktansi dihitung menggunakan bahasa pemrograman FORTRAN.

3.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras yang digunakan dalam proses perhitungan numerik adalah komputer *server* dengan sistem operasi yang berbasis *Linux*. Komputer *server* ini dijalankan secara *remote* dari perangkat laptop. Sedangkan perangkat lunak yang digunakan diantaranya:

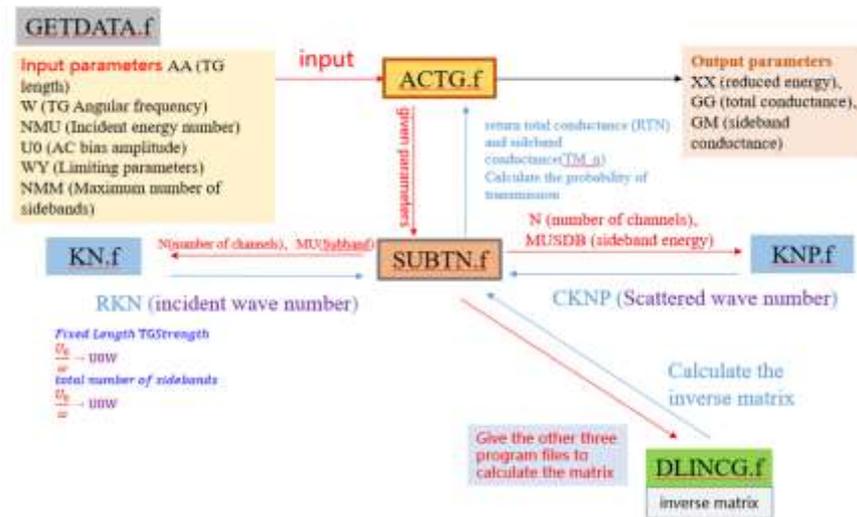
1. Microsoft Visual Studio dengan instalasi FORTRAN di dalamnya. Perangkat lunak ini digunakan untuk menulis dan memodifikasi kode yang nantinya akan dijalankan di komputer *server*.
2. Linux OS digunakan untuk menjalankan kode yang sudah ditulis sebelumnya.
3. Origin 2021 digunakan untuk menggambar grafik yang bersumber dari hasil perhitungan numerik yang dilakukan di Linux OS

3.2 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah dalam penelitian ini dibagi menjadi tiga tahap:

1. Penulisan Kode

Kode ditulis dengan bahasa pemrograman FORTRAN dasar, ilustrasi diagram alur berikut ini menjelaskan bagaimana kode bekerja.

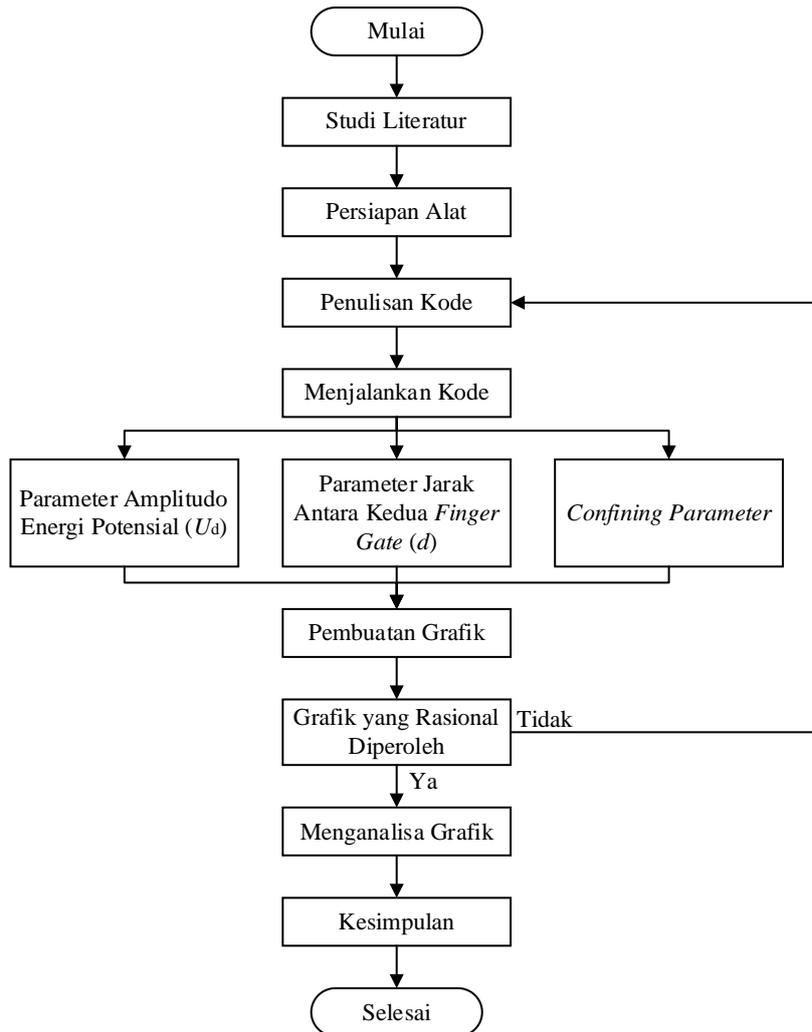


Gambar 3. Alur kode dalam melakukan perhitungan numerik

Gambar 3. Memberikan gambaran bagaimana kode bekerja, dan berikut adalah penjelasan singkat tentang bagaimana kode berjalan:

- a. **ACTG.f**: Kode utama untuk pemrosesan di mana semua perhitungan akhir dilakukan. Ini adalah bagian di mana semua hasil perhitungan utama diperoleh.
 - b. **GETDATA.f**: Kode untuk mendapatkan semua data masukan yang diperlukan untuk melakukan perhitungan. Perlu dicatat bahwa modifikasi utama biasanya dilakukan di dalam kode ini. Bagian ini adalah tempat di mana data masukan dapat dimodifikasi sesuai kebutuhan.
 - c. **KN.f** dan **KNP.f**: Kode bagian yang digunakan untuk menghitung nilai-nilai prasyarat yang diperlukan untuk menjalankan kode utama. Ini dapat mencakup perhitungan dasar atau persiapan data sebelum perhitungan utama dimulai.
 - d. **DLINCG.f**: Kode tambahan yang digunakan untuk menjalankan *scattering matrix*, terutama karena metode ini diperlukan untuk menghitung perangkat *double finger gates*.
2. Hasil Kode dan Pembuatan Grafik
 Setelah kode dijalankan, hasil berupa *reduced energy*, konduktansi total, dan konduktansi *sideband* diperoleh. Hasil ini akan terdiri dari setidaknya 1000 hasil untuk mendapatkan grafik yang cukup representatif. Proses pembuatan grafik dilakukan menggunakan perangkat Origin 2021
 3. Analisa Data
 Dari grafik tersebut, jumlah QBS (*Quantum Bound States*) akan terlihat dan dihitung berdasarkan seberapa kuat konduktansi elektron mereka dan sejauh mana mereka berada dari kondisi ideal. Ini akan memberikan informasi tentang jumlah dan karakteristik QBS dalam sistem, serta seberapa baik atau seberapa buruk kondisi mereka dalam mendukung konduktansi elektron.

3.3. Diagram Alir



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini, perhitungan dari total konduktansi elektrik dari sistem *double finger gate* yang dialiri arus AC dilakukan. Pada proses perhitungan, sistem struktur 2DEG diasumsikan difabrikasi dengan mobilitas yang sangat tinggi sehingga dapat mencapai kondisi yang paling ideal. Material yang digunakan yaitu GaAs-Al_xGa_{1-x}As dengan kepadatan elektron umum yaitu $n \sim 2.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ dan $m^* = 0.067m_e$. Selain itu, unit energi didefinisikan sebagai $E^* = 9 \text{ meV}$, unit dari frekuensi angular didefinisikan sebagai $\omega = E^* / \hbar = 1.37 \times 10^{11} \text{ rad/detik}$, dimana \hbar merupakan konstanta Planck yang direduksi, magnitudo dari *confining parameter* didefinisikan sebagai $\omega_y = (E^*)^{1/2} a^* = 0.375 \text{ meV}^{1/2} / \text{nm}$, jarak antara kedua *finger gate* didefinisikan sebagai d , lalu unit panjang didefinisikan sebagai $a^* = 8 \text{ nm}$, dimana k_f merupakan magnitudo dari vektor gelombang Fermi. Lebih daripada itu, nilai dari amplitudo potensial energi *double finger gate* adalah $E^* a^* = 72 \text{ meV} \cdot \text{nm}$.

4.1. Parameter Amplitudo Energi Potensial (U_d)

Berdasarkan studi literatur pada sistem yang serupa, parameter amplitudo energi potensial berpotensi memengaruhi hasil dari total konduktansi elektrik dari sistem. Riset yang dilakukan oleh Tang, dkk. menyebutkan bahwa dengan nilai yang serupa QBS pertama akan terbentuk di sekitar $X = 1.4 \text{ S}$ [7], namun dikarenakan sistem yang digunakan pada penelitian tersebut merupakan sistem *single finger gate*, sehingga total konduktansi elektrik pada sistem *double finger gate* akan lebih tinggi. Hal ini disebabkan karena adanya *scattering region* yang membuat elektron bergerak lebih efektif.

4.2. Parameter Jarak Antara Kedua Finger Gate (d)

Berdasarkan studi literatur pada sistem yang serupa, parameter jarak antara kedua *finger gate* berpotensi memengaruhi hasil dari total konduktansi elektrik dari sistem namun tidak memengaruhi jumlah QBS yang terbentuk. Riset yang dilakukan oleh Chen, dkk. mengungkapkan dalam sistem *double finger gate*, semakin besar jarak yang

dibuat, maka total konduktansi elektrik akan semakin besar, namun hal ini tidak memengaruhi jumlah QBS yang terbentuk [8]. Pada penelitian tersebut sistem *double finger gate* dialiri arus DC, sehingga total konduktansinya menjadi lebih tidak stabil. Semakin rendah jarak, total konduktansi elektrik menjadi semakin kecil, jika jarak mencapai 0 nm, maka sistem tersebut akan beroperasi layaknya seperti sebuah sistem *single finger gate*.

4.3. Parameter Confining Parameter (ω_y)

Berdasarkan studi literatur pada sistem yang serupa, parameter *confining parameter* berpotensi untuk memengaruhi jumlah QBS yang terbentuk. Pada penelitian Tang, dkk. mengungkapkan bahwa *confining parameter* akan memengaruhi energi photon tereduksi. Dimana untuk menemukan energi photon tereduksi tersebut didapat dari membagi *confining parameter* dengan pemisahan level *subband* yang nilainya 0.07 (Me.V)^{1/2}/nm. Sehingga, setiap kelipatan 0.007 akan memberikan jarak sebanyak energi tereduksi (X) sebanyak 1 S. [12]. Perbedaan yang signifikan akan terbentuk pada kekuatan total konduktansi elektron yang memengaruhi kuat elektron yang berhasil bertransmisi menuju *drain*.

5. Kesimpulan

Hasil prediksi perkiraan perhitungan ini berbasis pada beberapa studi literatur yang memiliki sistem yang serupa. Berdasarkan prediksi ini, amplitudo energi potensial (U_d) akan memengaruhi kuatnya total konduktansi elektrik yang dihasilkan oleh sistem, jarak antara kedua *finger gate* akan memengaruhi hasil dari total konduktansi elektrik dari sistem namun tidak memengaruhi jumlah QBS yang terbentuk dan parameter *confining parameter* berpotensi untuk memengaruhi jumlah QBS yang terbentuk namun tidak terlalu memengaruhi nilai total konduktansi elektrik.

6. Daftar Pustaka

- [1] M. Dan, G. Hu, L. Li, and Y. Zhang, "High performance quantum piezotronic tunneling transistor based on edge states of MoS₂ nanoribbon," *Nano Energy*, vol. 98, p. 107275, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107275>.
- [2] D. K. Ferry, J. Weinbub, M. Nedjalkov, and S. Selberherr, "A review of quantum transport in field-effect transistors," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 4, p. 43001, 2022, doi: 10.1088/1361-6641/ac4405.
- [3] R. Liu, G. Hu, M. Dan, Y. Zhang, L. Li, and Y. Zhang, "Piezotronic spin and valley transistors based on monolayer MoS₂," *Nano Energy*, vol. 72, p. 104678, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104678>.
- [4] C. Niu, G. Qiu, Y. Wang, M. Si, W. Wu, and P. D. Ye, "Bilayer Quantum Hall States in an n-Type Wide Tellurium Quantum Well," *Nano Lett.*, vol. 21, no. 18, pp. 7527–7533, Sep. 2021, doi: 10.1021/acs.nanolett.1c01705.
- [5] K. von Klitzing, "The quantized Hall effect," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 58, no. 3, pp. 519–531, Jul. 1986, doi: 10.1103/RevModPhys.58.519.
- [6] C. W. J. Beenakker and H. van Houten, "Quantum Transport in Semiconductor Nanostructures," *Solid State Phys. - Adv. Res. Appl.*, vol. 44, no. C, pp. 1–228, 1991, doi: 10.1016/S0081-1947(08)60091-0.
- [7] C. S. Tang, Y. Y. Chen, Q. H. Phan, N. R. Abdullah, and V. Gudmundsson, "AC-gate controlled transport sideband spectroscopy in GaAs quantum channels," *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, vol. 419, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.physleta.2021.127755.
- [8] W. A. Chen, Q. H. Phan, C. S. Tang, N. R. Abdullah, and V. Gudmundsson, "Quantum transport in p-type narrow channel with DC-biased double finger gate," *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, vol. 439, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.physleta.2022.128140.
- [9] G. R. Aizin, G. Gumbs, and M. Pepper, "Screening of the surface-acoustic-wave potential by a metal gate and the quantization of the acoustoelectric current in a narrow channel," *Phys. Rev. B*, vol. 58, no. 16, pp. 10589–10596, Oct. 1998, doi: 10.1103/PhysRevB.58.10589.
- [10] C. S. Tang, J. A. Keng, N. R. Abdullah, and V. Gudmundsson, "Spin magneto-transport in a Rashba–Dresselhaus quantum channel with single and double finger gates," *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, vol. 381, no. 17, pp. 1529–1533, 2017, doi: 10.1016/j.physleta.2017.03.005.
- [11] H. Z. Zheng, H. P. Wei, D. C. Tsui, and G. Weimann, "Gate-controlled transport in narrow GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterostructures," *Phys. Rev. B*, vol. 34, no. 8, pp. 5635–5638, Oct. 1986, doi: 10.1103/PhysRevB.34.5635.
- [12] C. S. Tang, Y. Y. Chen, Q. H. Phan, N. R. Abdullah, and V. Gudmundsson, "AC-gate controlled transport sideband spectroscopy in GaAs quantum channels," *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, vol. 419, 2021, doi: 10.1016/j.physleta.2021.127755.