

ANALISIS DINAMIKA RESPONS OPTIS *SEMICONDUCTOR QUANTUM DOTS THREE LEVEL SYSTEM* BERTIPE LAMDA

Riani-1^{a*}, Bintoro Siswo Nugroho-2^a,

^aProdi Fisika, FMIPA Universitas Tanjungpura

*Email : rianiborneo2018@gmail.com

Abstrak

Telah dilakukan penelitian secara teoretik pada SQD *three level* sistem bertipe lamda untuk menentukan respons optis yang muncul ketika sistem disinari laser pada intensitas tertentu. Penyelesaian SQD secara analitik menggunakan persamaan *density matrix* 3×3 menghasilkan persamaan diferensial terdang, selanjutnya persamaan *density matrix* diselesaikan secara numerik menggunakan metode Runge-Kutta Fehlberg (RKF 45). Dari metode ini diperoleh nilai populasi dan koheren dari elemen *density matrix* yang digunakan untuk menghitung respons optis pada SQD. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pada intensitas rendah osilasi populasi keadaan dasar hanya dapat terjadi ketika frekuensi keadaan saling beresonansi. Sedangkan populasi pada keadaan yang tidak beresonansi akan menunjukkan osilasi yang tidak jelas. Selain itu peningkatan intensitas yang diberikan oleh cahaya juga mempengaruhi osilasi populasi, semakin besar intensitas yang diberikan maka semakin besar amplitudo osilasi yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh adanya peningkatan frekuensi Rabi seiring meningkatnya intensitas cahaya datang yang diberikan.

Kata Kunci : SQD, *density matrix*, respon optis, populasi, spektrum energi

1. Latar Belakang

Teknologi yang berkembang dewasa ini mulai banyak memanfaatkan material berdimensi nano (nanomaterial). Nanomaterial tercatat sudah digunakan beberapa abad lalu, misalnya pada pemanfaatan nanopartikel emas sebagai pewarna anorganik pada porselin oleh bangsa China dan pemanfaatan nanopartikel logam sebagai artefak kaca Romawi agar menghasilkan variasi warna yang indah [1]. Nanomaterial merupakan kajian tentang material atau partikel berukuran nano dalam kisaran 1–100 nm [2]. Terdapat berbagai struktur dan jenis nanopartikel, di antaranya *quantum dot*, lipopartikel, nanokristal, nanopartikel polimer, dan nanopartikel magnetik.

Salah satu jenis nanopartikel yang menarik untuk dipelajari adalah *quantum dot*. *Quantum dot* adalah partikel berbahan semikonduktor berukuran nano (sekitar 2-100 nm). Partikel ini akan memancarkan sinar atau ber-*fluorescent* ketika disinari laser [3]. *Semiconductor quantum dot* (SQD) memiliki spektrum serapan diskrit layaknya atom, sehingga partikel ini biasa disebut juga *artificial atom* [4]. Karakteristik *quantum dot* memberikan peluang besar untuk diaplikasikan pada berbagai bidang *nanodevice*. Studi yang telah dilakukan sebelumnya menemukan bahwa SQD dapat diaplikasikan sebagai sensor optis pada alat *imaging*, *target labeling*, *sensitizer* sel surya, sensor temperatur [5], fotodetektor [6], modulator [7] dan terapi fotodinamik [8].

(SQD) yang ditinjau pada penelitian ini dimodelkan dalam *three level* sistem bertipe lamda. Iluminasi laser pada nanopartikel *quantum dot three level* sistem bertipe lamda akan menimbulkan interaksi yang menarik karakteristiknya. Oleh karena itu, penelitian ini akan menganalisa secara teori respons optis pada SQD yang dimodelkan dengan *three level* sistem bertipe lamda. Karakteristik yang akan ditinjau adalah respons optis dinamika waktu SQD pada beberapa variasi intensitas. Pada penelitian ini, persamaan yang digunakan untuk meninjau respons optis SQD adalah metode *density matrix*. Faktor *damping* pada sistem digambarkan dengan operator Lindblad. Untuk menyederhanakan perhitungan, Hamiltonian dirumuskan dalam pendekatan *rotating wave approximation*.

2. Model Teoretik

Sistem yang ditinjau pada penelitian ini adalah *semiconductor quantum dot* (SQD) tunggal, berbentuk bola dengan jari-jari r , diletakkan di *matrix* berbahan silika dengan permitivitas ruang hampa ϵ_b . SQD disinari cahaya laser monokromatik yang dimodelkan sebagai $E = E_0 \cos \omega_0 t (\hat{x} + \hat{y})$ (diilustrasikan oleh Gambar 2 (a)). Struktur elektronik SQD dimodelkan sebagai *three level* sistem bertipe lamda (diilustrasikan oleh Gambar 2 (b)) yang terdiri atas keadaan dasar $|1\rangle$ dengan energi keadaan dasar $\hbar\omega_1 = 0$, keadaan tereksitasi pertama $|2\rangle$ dengan energi $\hbar\omega_2$, dan keadaan tereksitasi kedua $|3\rangle$ dengan energi $\hbar\omega_3$. Tanda panah 2 arah menunjukkan bahwa transisi momen dipol

dapat terjadi antara keadaan $|3\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ serta sebaliknya, yang disimbolkan dengan $\vec{\mu}_{31}$ sepanjang sumbu \hat{x} dan $|3\rangle \leftrightarrow |2\rangle$, sebaliknya yang disimbolkan dengan $\vec{\mu}_{32}$ sepanjang sumbu \hat{y} . *Radiative damping* yang diperhitungkan dalam SQD *three level* sistem bertipe lamda adalah laju peluruhan. Laju peluruhan ditandai dengan garis bergelombang ke arah bawah yang menunjukkan adanya peluruhan dari keadaan $|3\rangle \rightarrow |1\rangle$ dengan simbol γ_{31} , keadaan $|3\rangle \rightarrow |2\rangle$ dengan simbol γ_{32} , dan keadaan $|2\rangle \rightarrow |1\rangle$ dengan simbol γ_{21} . Dinamika optis sistem dianalisis menggunakan persamaan *density matrix* yang dilengkapi oleh operator Lindblad berbentuk

$$\dot{\rho}_{mn} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}^{RWA}, \hat{\rho}]_{mn} + \hat{L}\{\rho(t)\} \quad (1)$$

Pada persamaan (1) kurung siku menotasikan komutator, sementara \hat{H}^{RWA} adalah operator Hamiltonian dalam pendekatan *rotating wave* dan $\hat{L}\{\rho(t)\}$ adalah operator Lindblad yang mendeskripsikan *radiative damping* pada sistem. Operator Hamiltonian dan operator Lindblad berturut-turut diekspresikan oleh persamaan berikut [9].

$$H^{RWA} = \hbar\Delta_{21}|2\rangle\langle 2| + \hbar\Delta_{31}|3\rangle\langle 3| - \hbar(\Omega_{31}|3\rangle\langle 1| + \Omega_{31}|1\rangle\langle 3| + \Omega_{32}|3\rangle\langle 2| + \Omega_{32}|2\rangle\langle 3|) \quad (2)$$

$$\hat{L}\{\rho(t)\} = \frac{1}{2}\gamma_{31}([\sigma_{13}\rho(t), \sigma_{31}] + [\sigma_{13}, \rho(t)\sigma_{31}]) + \frac{1}{2}\gamma_{32}([\sigma_{23}\rho(t), \sigma_{32}] + [\sigma_{23}, \rho(t)\sigma_{32}]) + \frac{1}{2}\gamma_{21}([\sigma_{12}\rho(t), \sigma_{21}] + [\sigma_{12}, \rho(t)\sigma_{21}]) \quad (3)$$

Persamaan (2) dan (3) digunakan untuk mencari persamaan gerak *density matrix*, sehingga diperoleh elemen persamaan *density matrix* secara lengkap sebagai berikut

$$\dot{\rho}_{11} = \gamma_{31}\rho_{33} + \gamma_{21}\rho_{22} + i\Omega_{31}\rho_{31} - i\Omega_{31}\rho_{13} \quad (4)$$

$$\dot{\rho}_{22} = -\gamma_{21}\rho_{22} + \gamma_{32}\rho_{33} + i\Omega_{32}\rho_{32} - i\Omega_{32}\rho_{23} \quad (5)$$

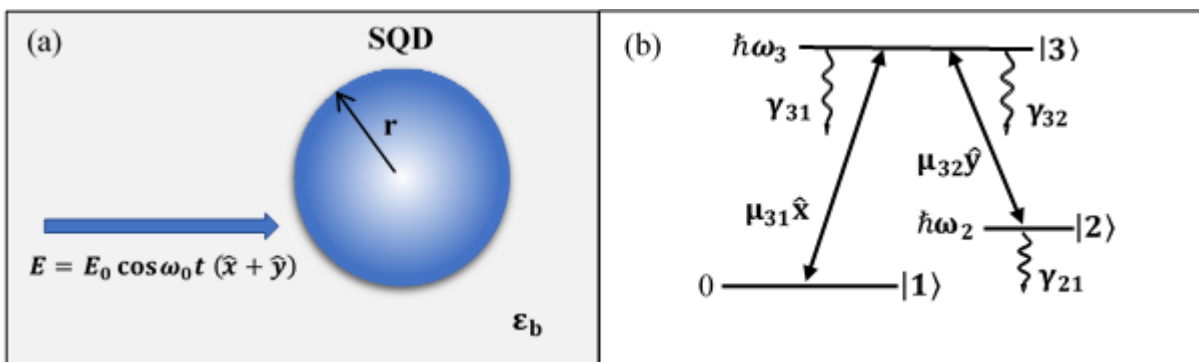
$$\dot{\rho}_{33} = (-\gamma_{31} - \gamma_{32})\rho_{33} + i\Omega_{31}\rho_{13} + i\Omega_{32}\rho_{23} - i\Omega_{31}\rho_{31} - i\Omega_{32}\rho_{32} \quad (6)$$

$$\dot{\rho}_{31} = \left(-i\Delta_{31} - \frac{1}{2}(\gamma_{31} + \gamma_{32})\right)\rho_{31} + i\Omega_{32}\rho_{21} + i\Omega_{31}\rho_{11} - i\Omega_{31}\rho_{33} \quad (7)$$

$$\dot{\rho}_{32} = \left(-i\Delta_{31} + i\Delta_{21} - \frac{1}{2}(\gamma_{31} + \gamma_{32} + \gamma_{21})\right)\rho_{32} + i\Omega_{31}\rho_{12} - i\Omega_{32}\rho_{33} + i\Omega_{32}\rho_{22} \quad (8)$$

$$\dot{\rho}_{21} = \left(-i\Delta_{21} - \frac{1}{2}\gamma_{21}\right)\rho_{21} + i\Omega_{32}\rho_{31} - i\Omega_{31}\rho_{23} \quad (9)$$

Elemen *density matrix* pada persamaan (4) sampai (9) adalah persamaan diferensial terkopel yang menggambarkan dinamika waktu pergerakan keadaan sistem secara lengkap. Setiap elemen *density matrix* memiliki interpretasi fisis yaitu elemen diagonal ρ_{ii} disebut populasi yang menunjukkan probabilitas menemukan sistem dikeadaan $|ii\rangle$. Keenam persamaan gerak elemen *density* tersebut akan diselesaikan menggunakan metode numerik Runge-Kutta-Fehlberg (RKF 45).



Gambar 2. (a) SQD ketika disinari cahaya monokromatik yang dimodelkan oleh medan klasik, dan (b) Struktur elektronik SQD *three level* sistem bertipe lamda.

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menggunakan beberapa parameter hasil penelitian terdahulu [10]. SQD yang digunakan merupakan SQD *three level*

sistem bertipe lamda dengan nilai energi frekuensi pada keadaan sistem berkisar 2,5 eV. SQD pada penelitian ini akan mengalami eksitasi jika menerima energi laser dengan frekuensi berkisar 2,5 eV. Momen dipol transisi (μ_{31} , μ_{32})

yang digunakan berturut-turut $0,3e$ nm dan $0,9e$ nm dengan e adalah besar muatan listrik. Nilai dari laju relaksasi yang digunakan adalah $\gamma_{31} = 3^{-9}s^{-1}$, $\gamma_{32} = \mu^2\gamma_{31}$ dan $\gamma_{21} = 0.01\gamma_{31}$ [10].

Pertama akan ditinjau respons optis dari ketergantungan populasi keadaan dasar (ρ_{11}) terhadap dinamika waktu. Grafik dinamika waktu populasi keadaan dasar diperoleh dari penyelesaian persamaan elemen *density matrix* menggunakan metode Runge-Kutta-Fehlberg (RKF 45). Pada kondisi awal sistem belum berinteraksi dengan medan pengeksitasi, sehingga $\rho_{11} = 1$ dan ρ_{nm} lainnya adalah 0. Hal ini menunjukkan bahwa sistem berada pada keadaan dasar sebelum berinteraksi dengan sinar datang. Dinamika waktu populasi keadaan dasar diplot dari 0 ns sampai 0,8 ns. Pada interval waktu ini, sistem telah mencapai *steady state* yang ditandai dengan grafik populasi membentuk garis lurus mendatar.

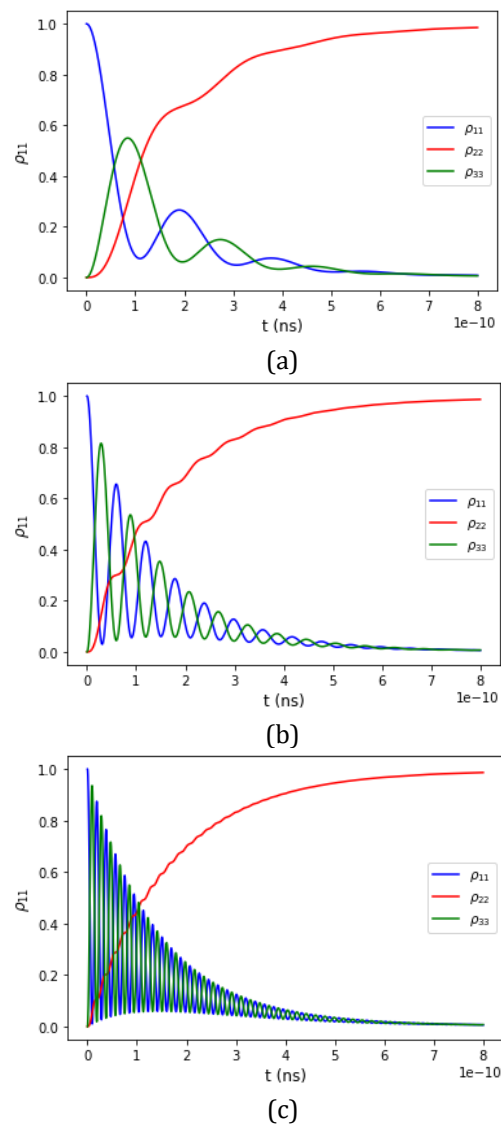
Grafik dinamika waktu populasi keadaan dasar dapat dilihat pada Gambar 2. Osilasi ρ_{11} terjadi ketika sistem mengalami eksitasi dan deeksitasi pada keadaan tertentu. Redaman pada gerak osilasi disebabkan oleh proses relaksasi keadaan sistem oleh parameter γ . Osilasi yang dihasilkan pada Gambar (2) menunjukkan transisi yang ideal hanya terjadi pada keadaan $|3\rangle$ (hijau) dan $|1\rangle$ (biru), sedangkan pada keadaan $|2\rangle$ (merah) eksitasi yang terjadi tidak menunjukkan osilasi yang jelas. Respons optis ini terjadi karena frekuensi sinar laser yang datang hanya beresonansi terhadap Δ_{31} dengan energi frekuensi sinar laser sama dengan energi frekuensi keadaan $|3\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ ($\omega_0 = \omega_{31}$). Energi pada Δ_{32} tidak beresonansi terhadap frekuensi sinar laser dikarenakan keadaan $|2\rangle$ memiliki energi sebesar 0,1 eV yang menunjukkan keberadaannya lebih tinggi dari keadaan dasar $|1\rangle$ sehingga dapat dipastikan bahwa ($\omega_0 \neq \omega_{32}$).

Fenomena lain yang muncul dari osilasi keadaan dasar yaitu adanya pengaruh intensitas sinar laser yang datang terhadap frekuensi Rabi. Terlihat pada Gambar 2 (b) dan (c) dengan variasi intensitas yang digunakan berturut-turut adalah 10 dan 100 W/cm² menunjukkan adanya frekuensi osilasi populasi dan amplitudo medan semakin membesar seiring meningkatnya intensitas. Secara teori semakin besar intensitas medan datang yang diberikan maka amplitudo medan semakin besar sehingga frekuensi Rabi juga meningkat. Hal ini bersesuaian dengan teori analitik dari frekuensi Rabi yaitu:

$$I = \frac{c \epsilon_0 E_0^2}{2} \quad (13)$$

$$\frac{\mu_{31}}{2\hbar} E_0 = \Omega_{31} \quad (14)$$

Dengan I adalah intensitas cahaya datang, E_0 adalah amplitudo medan, dan Ω_{31} adalah frekuensi Rabi.



Gambar 2 Grafik dinamika waktu terhadap populasi keadaan dasar untuk (a) $I = 1$ W/cm², (b) $I = 10$ W/cm², dan (c) $I = 100$ W/cm²

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa osilasi populasi hanya dapat terjadi di antara transisi yang beresonansi dengan frekuensi sinar datang dan peningkatan intensitas cahaya datang membuat osilasi populasi semakin besar dikarenakan meningkatnya frekuensi Rabi.

Daftar Pustaka

- [1] B. W. Nuryadin, *Pengantar Fisika Nanomaterial: Teori dan Aplikasi*. 2020.
- [2] R. Suwarda and M. S. Maarif, "Pengembangan Inovasi Teknologi Nanopartikel Berbasis Pat Untuk Menciptakan Produk Yang Berdaya Saing," *J. Tek. Ind.*, vol. 3, no. 2, pp. 104–122, 2013, doi: 10.25105/jti.v3i2.1572.
- [3] T. Sidqi, "Pembuatan dan Karakterisasi Nanopartikel Ekstrak Temulawak dengan Metode Ultrasonikasi," *Skripsi Dep. biokimia MIPA IPB*, pp. 1–20, 2011, [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/8754/1471feb50cef03c8098899bf8a36a9f2d307.pdf>
- [4] J. C. Woolley, *Introduction to Solid State Physics*, vol. 6, no. 1. 1957. doi: 10.1016/0022-5096(57)90051-0.
- [5] M. L. Landry, T. E. Morrell, T. K. Karagounis, C. H. Hsia, and C. Y. Wang, "Simple Syntheses of CdSe Quantum Dots," *J. Chem. Educ.*, vol. 91, no. 2, pp. 274–279, 2014, doi: 10.1021/ed300568e.
- [6] G. Konstantatos *et al.*, "Ultrasensitive Solution-Cast Quantum Dot Photodetectors," *Nature*, vol. 442, no. 7099, pp. 180–183, 2006, doi: 10.1038/nature04855.
- [7] D. Pacifici, H. J. Lezec, and H. A. Atwater, "All-optical modulation by plasmonic excitation of CdSe quantum dots," *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 7, pp. 402–406, 2007, doi: 10.1038/nphoton.2007.95.
- [8] A. C. S. Samia, X. Chen, and C. Burda, "Semiconductor Quantum Dots for Photodynamic Therapy," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 125, no. 51, pp. 15736–15737, 2003, doi: 10.1021/ja0386905.
- [9] I. V. Ryzhov, R. F. Malikov, A. V. Malyshev, and V. A. Malyshev, "Quantum Metasurfaces with Periodic Arrays of Lambda Emitters," pp. 1–14, 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2009.08284>
- [10] Y. Yulyanto and B. S. Nugroho, "Analisis Respons Optik Semiconductor Quantum Dot Sistem Three-Level Bertipe V," *Positron*, vol. 8, no. 1, p. 1, 2018, doi: 10.26418/positron.v8i1.25505.