

Studi Teoritik Respon Optik *Two-Level System Semiconductor Quantum Dots*

Rika Elfriana^a, Iklas Sanubary^a), Bintoro Siswo Nugroho^a)*,

^a) Jurusan Fisika, FMIPA Universitas Tanjungpura, Jalan Prof. Dr. Hadari Nawawi, Pontianak, Indonesia

*Email : b.s.nugroho@physics.untan.ac.id

Abstrak

Telah dilakukan penelitian teoritik untuk mempelajari respon optik *Semiconductor Quantum Dots* (SQD) ketika dieksitasi dengan cahaya monokromatik. SQD yang ditinjau dimodelkan sebagai *two-level system* yang terdiri dari keadaan dasar dan satu keadaan tereksitasi. Formalisme matematis yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *density matrix* yang solusinya diselesaikan secara analitik maupun numerik untuk mendapatkan osilasi Rabi dan spektrum SQD. Dari hasil yang diperoleh tampak bahwa karakteristik osilasi Rabi dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: selisih energi cahaya datang dengan energi *resonance*, intensitas cahaya datang, dan konstanta *damping* SQD. Sementara, hasil perhitungan spektrum menunjukkan bahwa lebar garis spektrum energi serapan SQD dipengaruhi oleh intensitas cahaya datang. Hal ini mengkonfirmasi gejala *power-broadening*.

Kata kunci : SQD, *Density matrix*, *Two Level system*

1. Latar Belakang

Dewasa ini, nanoteknologi mendapatkan perhatian yang besar dalam bidang sains dan industri, serta menjadi area penelitian bidang material yang sangat aktif. Beberapa contoh penerapan nanoteknologi yang telah dikembangkan diantaranya adalah, aplikasi *quantum dots/wires* pada teknologi sel surya generasi ketiga (1), penggunaan nanopartikel emas pada sensor DNA (2) dan aplikasi teknologi Nano-Tex pada industri tekstil (3).

Kemajuan dalam perkembangan teknologi fabrikasi bahan menyebabkan dimungkinkannya konstruksi material nano dengan bentuk dan ukuran yang diinginkan. Salah satu struktur nano yang banyak dieksplorasi saat ini adalah material semikonduktor dengan ukuran tipikal 2-8 nm yang disebut *Semiconductor Quantum Dots* (SQD) (4).

SQD mempunyai level energi diskrit yang disebabkan efek pengurangan kuantum (5). Saat SQD berinteraksi dengan cahaya, terjadi proses eksitasi dan deeksitasi periodik yang dikenal sebagai osilasi Rabi. Fenomena osilasi Rabi merupakan gejala umum yang terjadi pada *two-level system* yang beriterasi dengan medan osilatif dan merupakan efek penting yang dipelajari dalam bidang optika kuantum, resonansi magnetik, dan komputasi kuantum (6). Oleh karena itu, dinamika dan faktor yang memengaruhi osilasi Rabi pada SQD yang berinteraksi dengan cahaya menarik untuk dipelajari dan dieksplorasi.

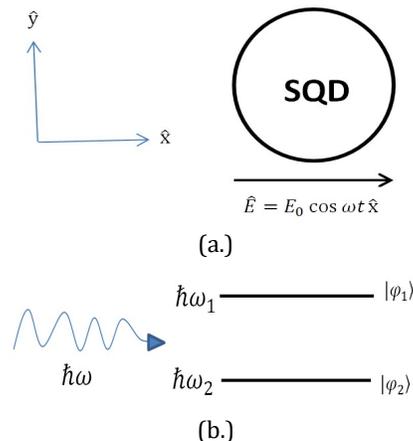
Disamping osilasi Rabi, fenomena penting lain yang terjadi saat SQD berinteraksi dengan cahaya adalah serapan energi. Besarnya energi yang diserap SQD berbeda-beda untuk tiap frekuensi cahaya yang diberikan. Representasi besar energi cahaya yang diserap untuk tiap frekuensi disebut sebagai spektrum serapan. Spektrum ini menggambarkan karakteristik

respon optik material yang merupakan informasi penting untuk memahami sifat bahan maupun melihat kemungkinan penggunaannya dalam divais elektronik atau optoelektronik.

Penelitian ini mempelajari sifat dan respon optik SQD saat beriteraksi dengan cahaya monokromatik. SQD yang ditinjau dimodelkan sebagai *two-level system* yang dianalisis dengan formalisme *density matrix*. Perhitungan elemen *density matrix* dilakukan secara analitik untuk kasus tanpa *damping* dan dilakukan secara numerik untuk kasus yang memperhitungkan *damping*. Hasil yang diperoleh memberikan gambaran pada osilasi Rabi yang terjadi pada SQD. Selain itu, dilakukan pula perhitungan spektrum serapan SQD untuk beberapa intensitas medan eksitasi.

2. Model Teoritik dan Formalisme

Sistem yang dipelajari dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1(a.) Sistem SQD dengan medan luar $\vec{E} = E_0 \cos \omega t \hat{x}$, (b.) Pemodelan *two-level system*.

Pada gambar 1(a), sistem yang digambarkan dengan sebuah SQD yang terletak di vakum dieksitasi oleh medan eksternal berbentuk $\vec{E} = E_0 \cos \omega t \hat{x}$, dengan ω adalah frekuensi osilasi, E_0 adalah amplitudo, dan \hat{x} adalah arah polarisasi medan. SQD yang ditinjau dimodelkan sebagai *two-level system* dengan dua keadaan kuantum, yaitu keadaan dasar $|\varphi_1\rangle$ dan keadaan tereksitasi $|\varphi_2\rangle$ dengan energi masing-masing sebesar $\hbar\omega_1$ dan $\hbar\omega_2$. Sementara, energi medan pengeksitasi \vec{E} energinya adalah $\hbar\omega$ [Gambar 1(b)].

Respon optik SQD dihitung secara teoritik menggunakan operator *density matrix* yang elemen-elemennya diperoleh dari persamaan Liouville-von Neumann berbentuk (7)

$$\frac{\partial \rho_{mn}}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}]_{mn} - \gamma_{mn} \rho_{mn} \quad (1)$$

Dengan ρ_{mn} elemen *density matrix*, γ_{mn} adalah konstanta *damping* antara keadaan $|\varphi_1\rangle$ dan $|\varphi_2\rangle$, $\hat{\rho}$ adalah operator *density matrix*, \hat{H} adalah operator Hamiltonian dari sistem. Operator Hamiltonian ini terdiri dari Hamiltonian yang tidak berinteraksi dengan apapun (\hat{H}_0) dan hamiltonian interaksi (\hat{H}_I). Maka operator \hat{H} direpresentasikan dengan

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_I \quad (2)$$

Bentuk *density matrix* pada *two-level system* adalah

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} \\ \rho_{21} & \rho_{22} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ρ_{11} dan ρ_{22} adalah elemen diagonal yang disebut populasi, probabilitas menemukan sistem pada keadaan $|\varphi_1\rangle$ dan $|\varphi_2\rangle$. Pada elemen non-diagonal ρ_{12} dan ρ_{21} merupakan koherensi antara keadaan $|\varphi_1\rangle$ dan $|\varphi_2\rangle$.

Sehingga, bentuk persamaan gerak elemen *density matrix* untuk *two-level system* dapat dituliskan sebagai

$$\frac{\partial \rho_{11}}{\partial t} = \gamma_{21} \rho_{22} + i \frac{\mu}{\hbar} E [\rho_{12}^* - \rho_{12}] \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_{22}}{\partial t} = -\gamma_{21} \rho_{22} - i \frac{\mu}{\hbar} E [\rho_{12} - \rho_{12}^*] \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_{12}}{\partial t} = -\left(\frac{1}{2}\gamma_{21} - i\omega_{21}\right) \rho_{12} - i \frac{\mu}{\hbar} E [\rho_{22} - \rho_{11}] \quad (6)$$

Operator elemen matriks bersifat hermitian maka $\rho_{12} = \rho_{21}^*$. Frekuensi ω_{21} adalah frekuensi transisi antara keadaan $|\varphi_1\rangle$ dan keadaan $|\varphi_2\rangle$.

Medan eksternal E diasumsikan harmonik terhadap waktu maka

$$E = \frac{\vec{E}_0}{2} (e^{-i\omega t} + e^{i\omega t}) \quad (7)$$

Pada saat $E(t)=0$ persamaan gerak elemen *off-diagonal density matrix* adalah $\frac{\partial \rho_{12}}{\partial t} = \rho_{12} e^{-(\frac{1}{2}\gamma_{21} - i\omega_{21})t}$, maka pada saat $\omega \approx \omega_{21}$ didapatkan definisi suku yang lambat terhadap waktu

$$\rho_{12} = e^{-i\omega t} \tilde{\rho}_{12} \quad (8)$$

Pada suku $e^{i\omega t}$ dan $e^{-i\omega t}$ terdapat nilai ω yang menyebabkan sistem beresilasi dengan cepat. Suku yang berotasi cepat terhadap waktu dapat diabaikan dengan menggunakan aproksimasi *Rotating Wave Approximation* (RWA). Dengan mensubstitusikan persamaan (8) ke persamaan (6), diperoleh

$$\frac{\partial}{\partial t} (e^{-i\omega t} \tilde{\rho}_{12}) = -\left(\frac{1}{2}\gamma_{21} - i\omega_{21}\right) e^{-i\omega t} \tilde{\rho}_{12} - i \frac{\mu}{\hbar} \vec{E}_0 e^{-i\omega t} Z \quad (9)$$

Sehingga diperoleh persamaan gerak elemen *density matrix* yang beresilasi lambat terhadap waktu sebagai berikut

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = -\gamma_{21}(Z + 1) + 2i\Omega (\tilde{\rho}_{12} - \tilde{\rho}_{12}^*) \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_{12}}{\partial t} = \left(i\delta - \frac{1}{2}\gamma_{21}\right) \tilde{\rho}_{12} + i\Omega Z \quad (11)$$

Selisih antara frekuensi cahaya datang dan frekuensi transisi disebut *detuning* $\delta = \omega_{21} - \omega$, $Z = \rho_{11} - \rho_{22}$ adalah beda populasi terhadap waktu. Frekuensi Rabi $\Omega = \mu \vec{E}_0 / \hbar$ merupakan frekuensi dari osilasi transisi atom pada saat berinteraksi dengan cahaya. Persamaan (10) dan (11) diselesaikan secara numerik dengan metode Runge-Kutta. Persamaan tersebut juga dapat diselesaikan secara analitik pada keadaan tunak.

Pada saat SQD disinari dengan cahaya, energi serapan dapat berasal dari energi konservatif pada elektromagnetik. Nilai energi (rata-rata waktu) yang terserap persatuan volume oleh induksi dipol pada SQD berhubungan persamaan Maxwell dan dapat dinyatakan

$$\left[\frac{P}{V}\right]_{\text{waktu}} = \left[\vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}\right]_{\text{waktu}} \quad (11)$$

tanda kurung siku menandakan rata-rata waktu. V adalah volume dari SQD, \vec{P} adalah polarisasi listrik (momen dipol listrik per volume), \vec{E} adalah *magnitude* yang berubah secara sinusoidal dari medan listrik. Polarisasi menghubungkan medan listrik dengan $\vec{P}(t) = \epsilon_0 \chi_E E(t)$ dan untuk menyederhanakan \vec{P}

dan \vec{E} diasumsikan paralel satu sama lain, maka (8)

$$Q = \frac{1}{2} \omega_{21} \epsilon_0 \text{Im}(\chi) |E_0|^2 \quad (12)$$

ϵ_0 adalah permivitas suatu medium (SQD). χ adalah suseptibilitas dari SQD, didefinisikan sebagai koefisien yang sebanding antara polarisasi (momen dipol per volume) dengan amplitudo dari kuat medan yang berinteraksi.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Osilasi Rabi tanpa Damping

Penelitian ini membahas osilasi Rabi pada SQD ketika berinteraksi dengan cahaya. Pada saat SQD berinteraksi dengan cahaya elektron akan mengalami eksitasi ke keadaan tereksitasi $|\varphi_2\rangle$ dan mengalami emisi terstimulasi kembali ke keadaan dasar $|\varphi_1\rangle$. Perhitungan populasi di antara dua keadaan tersebut dapat diselesaikan dengan metode analitik dan metode numerik.

a. Solusi Analitik

Jika dalam interaksi antara SQD dan medan cahaya tidak terdapat faktor *damping*, persamaan gerak yang mendeskripsikan interaksi tersebut memiliki bentuk yang lebih sederhana dan dapat diselesaikan secara analitik. Sehingga populasi pada keadaan dasar $|\varphi_1\rangle$ dan keadaan tereksitasi $|\varphi_2\rangle$ sebagai fungsi waktu t dapat diberikan dengan

$$\rho_{11} = \cos^2\left(\frac{1}{2}i\Omega't\right) + \frac{\delta^2}{\Omega'^2} \sin^2\left(\frac{1}{2}i\Omega't\right) \quad (13)$$

$$\rho_{22} = \frac{|2\Omega|^2}{\Omega'^2} \sin^2\left(\frac{1}{2}i\Omega't\right) \quad (14)$$

Ω' adalah bentuk umum dari frekuensi Rabi yang dinyatakan dengan $\Omega' = \sqrt{|2\Omega|^2 + \delta^2}$.

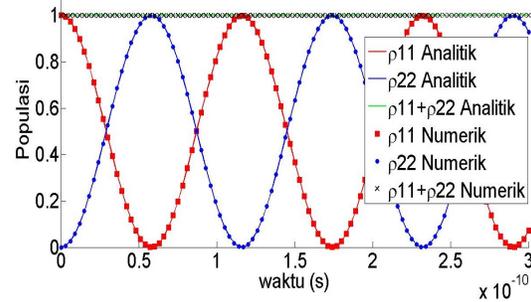
b. Solusi Numerik

Elemen *density matrix* ρ_{11} dan ρ_{22} dapat dihitung secara numerik, yaitu dengan menyelesaikan persamaan diferensial terkopel pada persamaan (9) dan (10) yang menggunakan Metode Runge-Kutta.

3.1.1 Osilasi Rabi pada keadaan resonansi

Hasil perhitungan analitik dan numerik osilasi Rabi pada keadaan resonansi yaitu frekuensi sinar datang dengan frekuensi transisi antar dua keadaan adalah sama, yang berarti *detuning* $\delta = \omega_{21} - \omega = 0$. Pada saat $\delta = 0$ sistem akan tereksitasi dengan sempurna, sistem akan terus berosilasi dengan amplitudo yang sama selama SQD terus disinari dengan cahaya. Pada Gambar 2. hasil perhitungan populasi yang ditunjukkan oleh elemen *density matrix* ρ_{11} dan ρ_{22} baik secara analitik maupun secara numerik adalah relatif sama. Dari

penggabungan dua grafik tersebut maka dapat disimpulkan bahwa diantara metode perhitungan analitik dan numerik menghasilkan osilasi Rabi yang menunjukkan perbedaan populasi seiring berjalannya waktu adalah sama persis.



Gambar 2. Grafik perbandingan solusi elemen *density matrix*

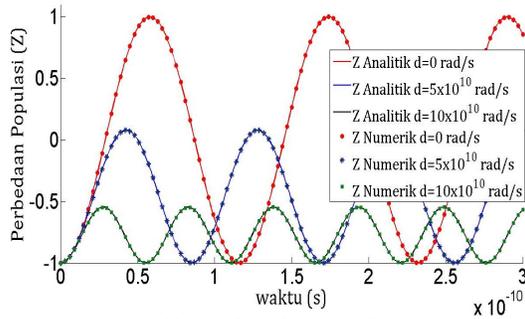
Pada keadaan dasar $|\varphi_1\rangle$ yang ditunjukkan dengan nilai ρ_{11} , populasi elektron pada awalnya bernilai 1 (100% elektron berada pada keadaan dasar $|\varphi_1\rangle$). Pada keadaan eksitasi $|\varphi_2\rangle$ yang ditunjukkan dengan nilai ρ_{22} , populasi elektron pada awalnya bernilai 0 (tidak ada elektron berada pada keadaan eksitasi $|\varphi_2\rangle$). Namun karena SQD berinteraksi dengan cahaya maka elektron pada keadaan dasar $|\varphi_1\rangle$ tereksitasi ke keadaan eksitasi $|\varphi_2\rangle$, yang menyebabkan populasi pada keadaan dasar berkurang. Setelah mengalami eksitasi, eksiton tersebut cenderung kembali pada keadaan dasar, proses tersebut dinamakan emisi terstimulasi. Proses eksitasi dan emisi stimulasi itu akan terus terjadi selama cahaya diberikan ke sistem pada SQD.

3.1.2 Osilasi Rabi pada Keadaan *off-resonance*

Cahaya yang datang ke SQD memiliki frekuensi cahaya ω dapat diatur secara akurat untuk mengetahui perubahan osilasi Rabi jika frekuensi cahaya diubah. Energi pada keadaan dasar $|\varphi_1\rangle$ dan keadaan tereksitasi $|\varphi_2\rangle$ adalah $\hbar\omega_1$ dan $\hbar\omega_2$, maka selisih frekuensi antara dua level tersebut adalah $\omega_{21} = \omega_2 - \omega_1$. Agar elektron pada SQD tereksitasi dengan sempurna ω_{21} harus mendekati frekuensi cahaya yang datang ω .

Pada Gambar 3. menunjukkan osilasi Rabi yang tidak beresonansi untuk masing-masing nilai δ . Dari penggabungan grafik osilasi Rabi secara analitik dan secara numerik maka dapat disimpulkan bahwa diantara metode perhitungan analitik dan numerik menghasilkan osilasi Rabi yang menunjukkan perbedaan populasi seiring berjalannya waktu adalah sama. Pada osilasi Rabi tidak resonansi atau *detuning* tidak sama dengan nol, populasi tidak tereksitasi

dengan sempurna sehingga populasi pada keadaan $|\varphi_2\rangle$ tidak pernah 100%.

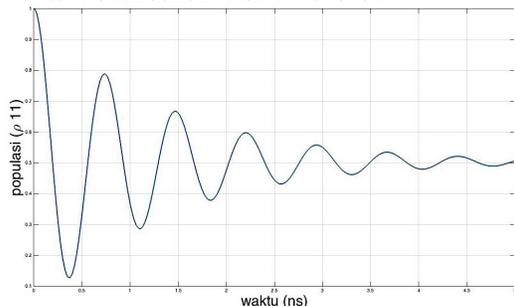


Gambar 3. Grafik perbandingan *detuning* pada osilasi Rabi tanpa *damping*

Detuning memengaruhi frekuensi dan amplitudo dari osilasi tersebut. Semakin besar nilai δ maka amplitudo semakin kecil dan frekuensi semakin besar. Hal tersebut sesuai dengan perhitungan analitik yang menyatakan nilai δ sebanding dengan frekuensi Rabi. Sehingga jika nilai δ meningkat maka frekuensi pada osilasi populasi akan meningkat.

3.2 Karakteristik Osilasi Rabi dengan *Damping*

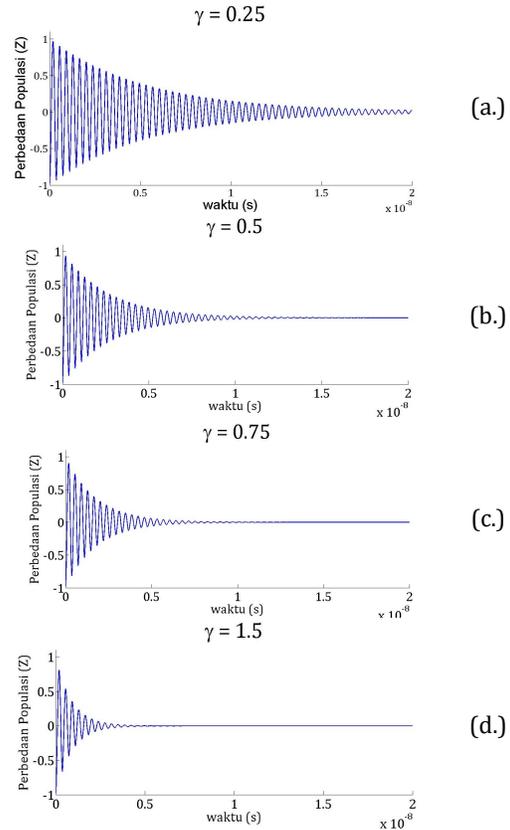
Konstanta *damping* memengaruhi tingkat kekakuan getaran dari SQD. Konstanta *damping* SQD yang diperbesar akan meredam osilasi Rabi lebih cepat hingga mencapai keadaan tunak. Adanya *damping* menyebabkan amplitudo dari isolasi Rabi berkurang perlahan-lahan hingga menjadi nol. Perbedaan populasi yang didapatkan dari selisih diagonal *density matrix* $\tilde{\rho}_{22}$ dan $\tilde{\rho}_{11}$ didefinisikan sebagai Z. Perbedaan populasi cenderung berkurang seiring dengan waktu menandakan nilai Z menurun.



Gambar 4. Grafik populasi eksiton pada keadaan dasar $|\varphi_1\rangle$

Dari gambar 4, pada keadaan dasar $|\varphi_1\rangle$ yang ditunjukkan dengan nilai ρ_{11} , populasi elektron pada awalnya bernilai 1 (100% elektron berada pada keadaan dasar $|\varphi_1\rangle$). Namun karena SQD berinteraksi dengan cahaya maka elektron pada keadaan dasar $|\varphi_1\rangle$ tereksitasi ke keadaan eksitasi $|\varphi_2\rangle$, yang

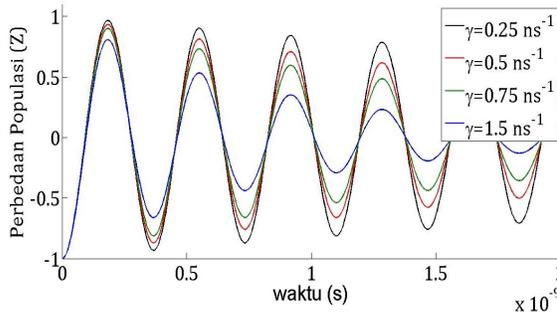
menyebabkan populasi pada keadaan dasar berkurang. Setelah mengalami eksitasi, eksiton tersebut cenderung kembali ke keadaan dasar, proses tersebut dinamakan relaksasi. Relaksasi tersebut tidak sepenuhnya mengembalikan eksiton ke keadaan dasar, maka eksiton akan terus berkurang. Eksiton berhenti mengalami eksitasi dan relaksasi pada saat *steady state*, yaitu setelah tidak ada perbedaan populasi antara keadaan dasar dan keadaan eksitasi.



Gambar 5. Grafik perbedaan populasi terhadap waktu untuk intensitas cahaya 10 Wcm^{-2} . (a.) untuk nilai $\gamma = 0,25 \text{ ns}^{-1}$; (b.) untuk nilai $\gamma = 0,5 \text{ ns}^{-1}$; (c.) untuk nilai $\gamma = 0,75 \text{ ns}^{-1}$; (d.) untuk nilai $\gamma = 1,5 \text{ ns}^{-1}$

Pada penelitian ini, perhitungan pengaruh konstanta *damping* (γ) terhadap osilasi Rabi menggunakan 4 variasi nilai γ , yaitu 0,25, 0,5, 0,75 dan 1,5 ns^{-1} . Didapatkan bahwa konstanta *damping* memengaruhi tingkat kekakuan getaran dari SQD. Konstanta *damping* SQD yang diperbesar akan meredam osilasi Rabi lebih cepat hingga mencapai keadaan tunak. Adanya *damping* menyebabkan amplitudo dari isolasi Rabi berkurang perlahan-lahan hingga menjadi nol. Perbedaan populasi cenderung berkurang seiring dengan waktu menandakan nilai Z menurun.

Pada Gambar 5. dapat dilihat bahwa semakin besar nilai γ semakin cepat osilasi Rabi mencapai *steady state*. Pada penelitian ini juga dilihat hubungan antara perubahan konstanta *damping* SQD dan frekuensi Rabi. Intensitas cahaya yang digunakan untuk menghitung perubahan frekuensi Rabi adalah 10 Wcm^{-2} . Untuk mengetahui pengaruh konstanta *damping*, digunakan 4 variasi nilai konstanta *damping* γ yaitu $0,25; 0,5; 0,75; \text{ dan } 1,5 \text{ ns}^{-1}$. Pada gambar 6 dilihat bahwa keempat nilai konstanta *damping* mempunyai frekuensi Rabi yang sama yaitu $4 \times 10^9 \text{ Hz}$. Maka dapat disimpulkan bahwa konstanta *damping* tidak memengaruhi frekuensi Rabi pada SQD.



Gambar 6. Grafik perbedaan populasi terhadap waktu untuk 4 variasi konstanta *damping* ($\gamma = 0,25; 0,5; 0,75; 1,5 \text{ ns}^{-1}$)

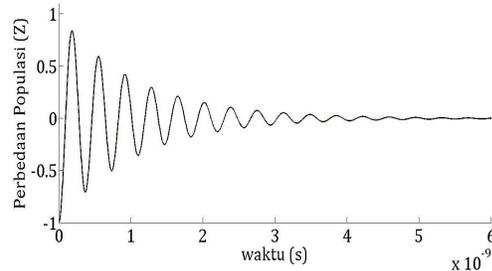
Namun perubahan amplitudo berbeda pada masing-masing nilai konstanta *damping*. Semakin besar konstanta *damping* maka amplitudo berkurang lebih signifikan. Hal itu menyebabkan SQD dengan nilai konstanta *damping* paling besar akan mencapai *steady state* lebih cepat.

3.3 Pengaruh Intensitas Cahaya terhadap Osilasi Rabi

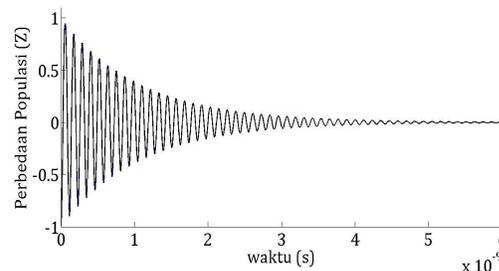
Pengaruh Intensitas cahaya terhadap dinamika osilasi Rabi juga diamati dengan variasi Intensitas cahaya 10 Wcm^{-2} dan 100 Wcm^{-2} , dan menggunakan variasi konstanta *damping* γ yang sama. Terdapat perubahan frekuensi Rabi yang dipengaruhi oleh perbedaan intensitas cahaya yang diberikan. Jika intensitas suatu medan cahaya yang menuju SQD diperbesar, maka jumlah getaran persatuan waktu dari osilasi Rabi akan semakin besar dan gelombang osilasi Rabi semakin rapat. Intensitas cahaya memengaruhi energi cahaya tersebut, maka jika intensitas cahaya diperbesar maka energi cahaya tersebut semakin besar dan frekuensi Rabi semakin besar pula.

Pada Gambar 7. menunjukkan pengaruh intensitas cahaya yang diberikan kepada SQD terhadap osilasi Rabi SQD tersebut. Dapat dilihat

bahwa besar frekuensi Rabi pada intensitas 100 Wcm^{-2} adalah 4 kali frekuensi pada intensitas 10 Wcm^{-2} . Hal tersebut menandakan intensitas cahaya memengaruhi frekuensi Rabi, semakin besar intensitas cahaya maka frekuensi Rabi akan semakin bertambah.



(a.)



(b.)

Gambar 7. Grafik perbedaan populasi terhadap waktu untuk (a.) Intensitas Cahaya 10 Wcm^{-2} dan (b.) Intensitas cahaya 100 Wcm^{-2}

Hal tersebut sesuai dengan hasil yang diperoleh secara analitik. Besar intensitas cahaya berhubungan dengan medan cahaya tersebut.

$$I = \frac{c \epsilon_0 E_0^2}{2} \tag{15}$$

dari persamaan (9) dilihat bahwa intensitas cahaya sebanding dengan kuadrat dari amplitudo medan cahaya tersebut. Maka berdasarkan persamaan $\Omega = \vec{\mu}_{12} \vec{E}_0 / \hbar$ yang menyatakan kuat medan cahaya sebanding dengan frekuensi Rabi, intensitas cahaya berpengaruh terhadap frekuensi Rabi.

3.4 Spektrum Energi Serapan

Interaksi antara cahaya dan SQD menghasilkan penyerapan dari cahaya yang datang sehingga eksiton pada SQD tereksitasi. Energi serapan pada SQD dapat dihitung dari Persamaan (12)

a. Solusi Analitik

Pada solusi analitik, energi serapan dihitung dengan menyelesaikan solusi diferensial persamaan *density matrix*, dengan meninjau keadaan tersebut dalam keadaan

steady state. Pada saat sistem *steady state* populasi pada setiap keadaan kuantum tidak berubah terhadap waktu, maka persamaan gerak elemen *density matrix* yang ditunjukkan pada Persamaan (9) dan (10) adalah sama dengan nol, maka didapatkan

$$Z = - \left[\frac{\delta^2 + \frac{1}{4}\gamma^2}{\delta^2 + \frac{1}{4}\gamma^2 + 2\Omega^2} \right] \quad (16)$$

$$\tilde{\rho}_{12} = \left(\frac{Z\Omega}{\delta + \frac{1}{2}i\gamma} \right) \quad (17)$$

Pada Persamaan (6), perhitungan spektrum energi serapan dari SQD memerlukan perhitungan nilai suseptibilitas χ . Suseptibilitas SQD didapatkan dengan menyelesaikan persamaan *density matrix*. Polarisasi dari SQD dihitung dari momen dipol per-volume (8)

$$P = N\langle \hat{\mu} \rangle \quad (18)$$

fase fungsi eigen diantara keadaan $|\varphi_1\rangle$ dan $|\varphi_2\rangle$ adalah sama, maka momen dipol transisi $\mu_{12} = \mu_{21} = \mu$. Suseptibilitas χ didefinisikan sebagai bentuk konstanta antara P dan E_0

$$P_0 = \epsilon_0\chi E_0 \quad (19)$$

maka suseptibilitas χ adalah

$$\chi = - \frac{2N\mu^2Z}{\epsilon_0\hbar \left(\delta + \frac{1}{2}i\gamma \right)} \quad (20)$$

b. Solusi Numerik

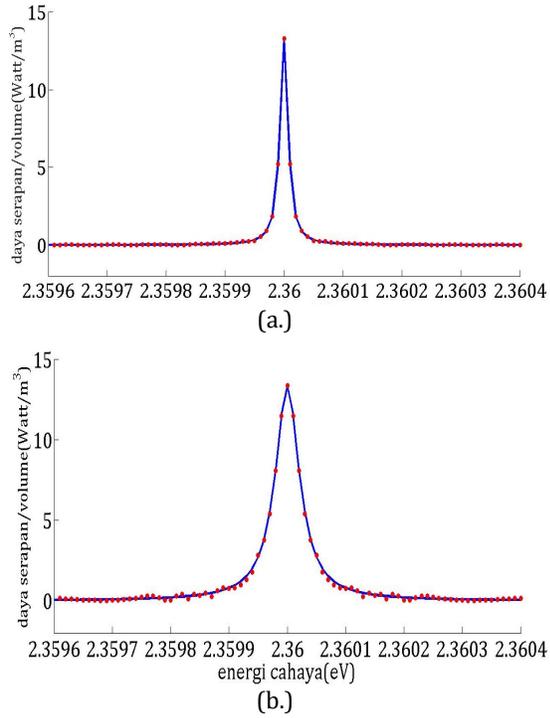
Perhitungan numerik spektrum energi serapan Q dimulai dengan memasukkan nilai elemen *density matrix* $\tilde{\rho}_{12}$ ke persamaan (18). Elemen *density matrix* $\tilde{\rho}_{12}$ didapatkan dengan menyelesaikan diferensial terkopel pada persamaan (9) dan (10) menggunakan metode Runge Kutta orde 4. Dari nilai polarisasi pada persamaan (19) maka suseptibilitas χ yang didapatkan dari langkah numerik adalah

$$\chi = \frac{2N\mu\tilde{\rho}_{12}}{\epsilon_0 E_0} \quad (21)$$

Perhitungan pengaruh intensitas cahaya (I) terhadap daya serapan (Q) menggunakan nilai $\gamma=1 \text{ ns}^{-1}$ dan menggunakan 2 variasi nilai intensitas cahaya, yaitu 1 Wcm^{-2} dan 100 Wcm^{-2} .

Berdasarkan perbandingan spektrum energi serapan dengan intensitas 1 Wcm^{-2} dan 100 Wcm^{-2} , interval daya yang diserap berbeda pada masing-masing intensitas. Interval daya serap pada Gambar 8(b.) adalah lebih lebar daripada gambar 8(a.). Hal tersebut terjadi karena intensitas cahaya yang diberikan pada Gambar 8(b.) lebih besar. Maka terjadi hubungan antara spektrum daya serap dan

intensitas cahaya yaitu Interval daya serapan akan semakin lebar jika intensitas cahaya diperbesar.



Gambar 8. Spektrum daya serapan terhadap energi cahaya untuk (a.) intensitas cahaya 1 Wcm^{-2} dan (b.) Intensitas cahaya 100 Wcm^{-2}

Kebergantungan interval energi serapan pada *detuning* δ ditunjukkan pada Gambar 8(a.) dan 8(b.). Hal ini menggambarkan spektrum energi serapan. Lebar spektrum dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang datang. Fenomena ini disebut *power broadening* pada spektrum. *Power broadening* merupakan efek langsung dari interval spektrum. Pada sisi-sisi spektrum penyerapan energi akan terus meningkat dengan meningkatnya intensitas cahaya, namun pada sisi tengah ($\delta=0$) penyerapan energi akan tetap sama walaupun intensitas cahaya meningkat. Daya serapan pada keadaan resonan adalah penyerapan jenuh, sedangkan pada sayap spektrum dipengaruhi oleh intensitas cahaya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa osilasi Rabi dapat dipengaruhi oleh konstanta *damping* (γ) SQD. Semakin besar γ maka osilasi Rabi semakin cepat mencapai *steady state*. Frekuensi Rabi dapat dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang menuju SQD. Semakin besar intensitas cahaya yang diberikan

maka jumlah getaran persatuan waktu akan semakin besar.

Sedangkan spektrum daya serapan (Q) terhadap energi cahaya akan berubah jika intensitas cahaya yang diberikan berbeda. Interval daya serapan akan semakin lebar jika intensitas cahaya diperbesar. Fenomena yang memengaruhi lebar interval adalah *power broadening*.

Daftar Pustaka

1. Alim MA,SR,KMA,RNA,AZ. Solar energy harvesting with the application of nanotechnology. 2013; 26: p. 837-852.
2. Astruc MCDaD. Gold Nanoparticles: Assembly, Supramolecular Chemistry, Quantum-Size-Related Properties, and Applications toward Biology, Catalysis, and Nanotechnology. 2004; 104: p. 293-346.
3. Wong YWH,YCWM,LMYS,KSKA,LHLI. Selected applications of nanotechnology in textiles. AUTEX Research Journal. 2006; 6(1): p. 1-8.
4. Gerion D,PF,WSC,PWJ,ZD,WS,&AAP. Synthesis and properties of biocompatible water-soluble silica-coated CdSe/ZnS semiconductor quantum dots. The Journal of Physical Chemistry B. 2001; 105(37): p. 8861-8871.
5. Breuer H, Petruccione F. 2002;; p. 110.
6. Stievater TH,LX,SDG,GD,KDS,PD.&SLJ. Rabi oscillations of excitons in single quantum dots. Physical Review Letters. 2001; 87(13): p. 133603.
7. Boyd RW. Nonlinier Optic. 3rd ed. New York: Academic Press; 2007.
8. Nugroho BS. Optical Response of Nanohybrids: Effects of Exciton-Plasmon Interaction. In.: Zernike Institute for Advanced Materials of the University of Groningen; 2016.