

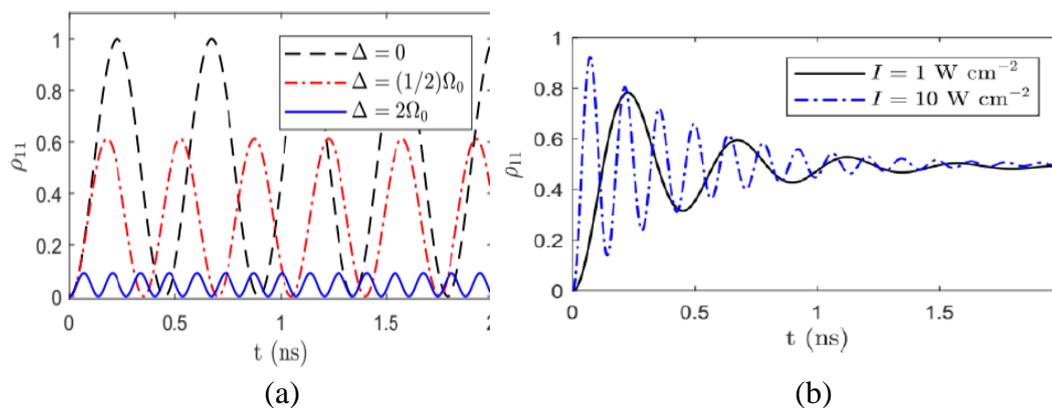
BAB II

DASAR TEORI

2.1 *Semiconductor Quantum Dot*

Perkembangan teknologi pabrikasi material telah memungkinkan dihasilkannya nanopartikel dengan berbagai ukuran dan bentuk. Nanopartikel tersebut dirancang dan disiapkan dengan molekul dan struktur partikel yang dapat menunjukkan fungsi dan respon yang diinginkan untuk pengaplikasiannya. SQD menjadi satu diantara partikel struktur nano yang banyak digunakan untuk dieksplorasi respon optisnya. SQD adalah *nanocrystals* anorganik dengan ukuran <10 nm yang memiliki sifat *luminescent* yang unik, emisi *fluorescence* yang dimilikinya stabil dan dapat dikontrol dengan memvariasikan ukuran partikel atau komposisinya (Naito et al., 2018).

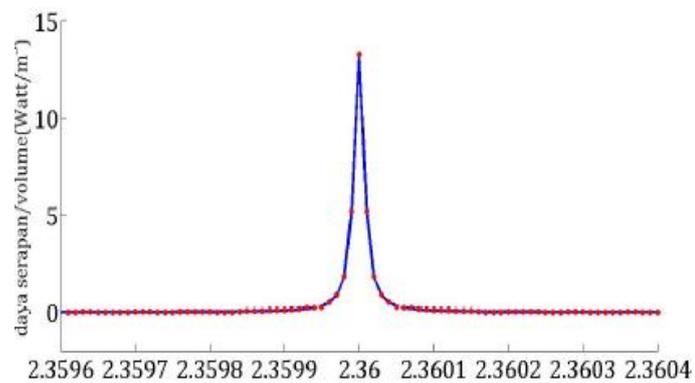
Ketika SQD berinteraksi dengan cahaya, fenomena osilasi Rabi yang merupakan bagian penting yang dipelajari dalam bidang kuantum optik, resonansi magnetik dan komputasi kuantum pun muncul. Karakteristiknya dipengaruhi oleh selisih energi cahaya datang dengan energi resonansi, intensitas cahaya datang, dan konstanta *damping* SQD (Nugroho and Arman, 2018).



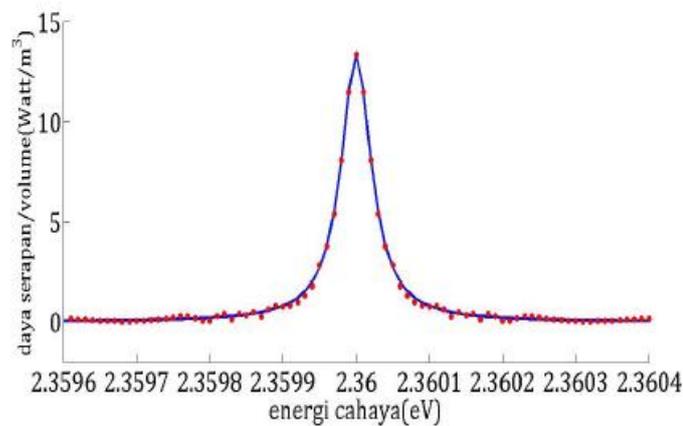
Gambar 2.1 Osilasi Rabi SQD tunggal (a) tanpa proses relaksasi dengan variasi nilai *detuning* Δ dan (b) osilasi Rabi SQD tunggal dengan proses relaksasi untuk dua nilai intensitas medan pengeksitasi (Nugroho and Arman, 2018).

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.1, eksitasi yang terjadi pada SQD semakin tidak efektif seiring dengan semakin besarnya perbedaan frekuensi medan luar dengan frekuensi eksitasi eksiton. Selain itu, frekuensi osilasi Rabi meningkat seiring dengan membesarnya nilai *detuning* dan intensitas medan pengeksitasi. Proses relaksasi yang terjadi pada SQD mengakibatkan osilasi Rabi mengalami redaman dan perlahan mencapai keadaan tunak (Nugroho and Arman, 2018).

Tidak hanya osilasi Rabi, lebar garis spektrum energi serapan SQD juga dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang datang.



(a)



(b)

Gambar 2.2 Spektrum daya serapan SQD terhadap energi cahaya dengan (a) $I=1 \text{ Wcm}^{-2}$ (b) $I=100 \text{ Wcm}^{-2}$ (Elfriana *et al.*, 2018).

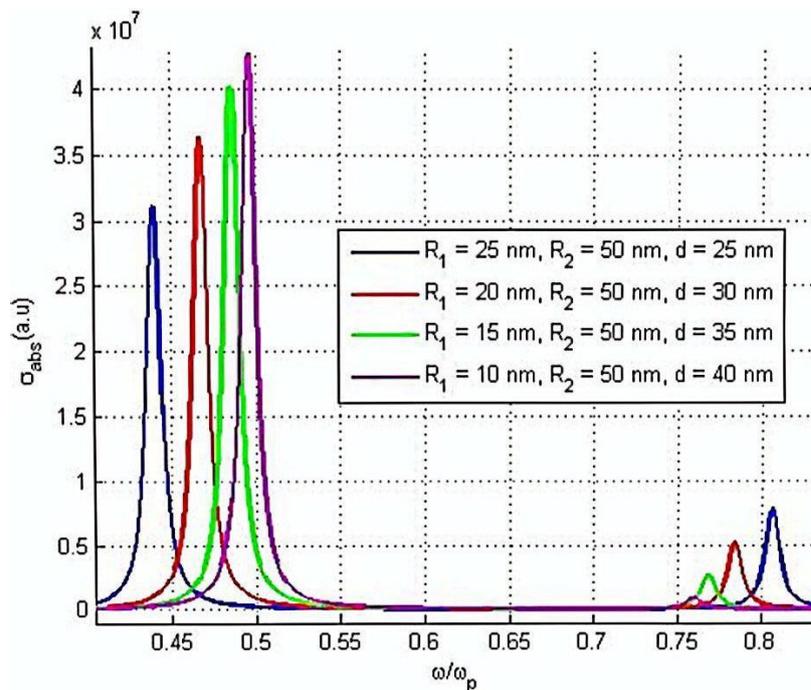
Gambar 2.2 menampilkan spektrum serapan SQD terhadap energi cahaya dengan variasi nilai intensitas medan pengeksitasi. Lebar interval spektrum serapan

semakin meningkat seiring dengan semakin tingginya intensitas medan pengeksitasi. Peristiwa ini disebut sebagai *power broadening* (Elfriana *et al.*, 2018).

2.2 Metal Nanoshell

Selain SQD, partikel struktur nano lainnya yang menarik perhatian adalah MNS. MNS memiliki sifat-sifat menarik yang sangat bergantung pada ketebalan *shell* dan ukurannya (Westcott *et al.*, 2002; Kulish and Tomchuk, 2008). Sebelumnya, Westcott *et al.* (2002) telah melakukan eksperimen untuk mensintesis plasmon *shell* dengan frekuensi serapan yang terkontrol. Frekuensi penyerapan plasmon bergantung pada rasio jari-jari inti dan ketebalan kulit.

MNS dengan inti dielektrik dilapisi metal yang diletakkan pada medium yang memiliki fungsi dielektrik sama dengan intinya menghasilkan respon optis yang bergantung pada ketebalan metal.



Gambar 2.3 Spektrum penampang lintang serapan cahaya pada nanopartikel berstruktur dielektrik-metal dengan variasi ketebalan metal (Fitriyadi *et al.*, 2020).

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.3, adanya variasi ketebalan metal mengakibatkan terjadinya pergeseran puncak daerah serapan ke frekuensi tinggi atau rendah serta meningkatkan dan menurunkan puncak penampang lintang

serapan cahaya (Fitriyadi *et al.*, 2020). Secara klasik, respon optis MNS yang memiliki inti dielektrik dengan radius r_1 dan konstanta dielektrik ε_c yang dilapisi logam dengan ketebalan $r_2 - r_1$ dan fungsi dielektrik $\varepsilon_m(\omega)$ digambarkan secara klasik oleh polarisabilitasnya $\alpha(\omega)$ yang dalam pendekatan *quasistatic* dituliskan sebagai berikut (Bohren and Huffman, 1983):

$$\alpha(\omega) = 4\pi r_2^3 \frac{[\varepsilon_c + 2\varepsilon_m(\omega)][\varepsilon_m(\omega) - \varepsilon_b] + (r_1/r_2)^3 [\varepsilon_c - \varepsilon_m(\omega)][\varepsilon_b + 2\varepsilon_m(\omega)]}{[\varepsilon_m(\omega) + 2\varepsilon_b][\varepsilon_c + 2\varepsilon_m(\omega)] + 2(r_1/r_2)^3 [\varepsilon_m(\omega) - \varepsilon_b][\varepsilon_c - \varepsilon_m(\omega)]} \quad (2.1)$$

2.3 Formalisme *Density Matrix*

Density matrix merupakan matriks yang menggambarkan keadaan statistik dari suatu sistem kuantum. Keadaan suatu sistem kuantum dideskripsikan oleh suatu fungsi keadaan yang mengandung semua informasi tentang sistem tersebut. Ada kalanya, fungsi keadaan ini tidak dapat diketahui secara pasti, misalkan akibat tidak lengkapnya informasi tentang sistem maupun akibat adanya interaksi yang terjadi pada sistem tersebut. Sistem yang tidak diketahui keadaannya secara pasti ini disebut sebagai sistem pada keadaan *mixed state*. Sebelum membahas lebih jauh sistem kuantum yang berada dalam keadaan *mixed state*, terlebih dahulu tinjau sistem kuantum yang berada pada keadaan *pure state*, ketika fungsi keadaan kuantum $\Psi(\mathbf{r}, t)$ diketahui secara pasti. Ketika sistem berada pada keadaan *pure state*, keadaan suatu sistem dapat diwakilkan oleh $|\Psi(\mathbf{r}, t)\rangle$ dan dapat dinyatakan sebagai superposisi dari basis orthonormalnya $\{|\varphi_n\rangle\}$.

$$|\Psi(\mathbf{r}, t)\rangle = \sum_n C_n(t) |\varphi_n(\mathbf{r})\rangle \quad (2.2)$$

Nilai ekspektasi dari *observable* sistem tersebut jika vektor keadaan di persamaan 2.2 diketahui, dapat dihitung dengan

$$\begin{aligned} \langle \hat{O} \rangle &= \langle \Psi(\mathbf{r}, t) | \hat{O} | \Psi(\mathbf{r}, t) \rangle \\ &= \left(\langle \varphi_m(\mathbf{r}) | \sum_m C_m^*(t) \right) \hat{O} \left(\sum_n C_n(t) |\varphi_n(\mathbf{r})\rangle \right) \\ &= \sum_m \sum_n C_m^*(t) C_n(t) \langle \varphi_m(\mathbf{r}) | \hat{O} | \varphi_n(\mathbf{r}) \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{m,n} C_m^*(t) C_n(t) \langle \varphi_m(\mathbf{r}) | \hat{O} | \varphi_n(\mathbf{r}) \rangle \\
&= \sum_{m,n} C_m^*(t) C_n(t) O_{mn}.
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Tetapi, jika sistem dengan keadaan campuran (*mixed state*) dan keadaan sistem tidak diketahui secara pasti $|\Psi^S\rangle = |\Psi^1\rangle, |\Psi^2\rangle, |\Psi^3\rangle, \dots, |\Psi^N\rangle$ dengan probabilitas $p_S = p_1, p_2, p_3, \dots, p_N$, nilai ekspektasinya didefinisikan sebagai rata-rata statistik dari ensemble dan dapat diperoleh dari rata-rata persamaan 2.3.

$$\overline{\langle \hat{O} \rangle} = \sum_{m,n} \sum_{S=1}^N p_S C_m^{S*}(t) C_n^S(t) O_{mn} = \sum_{m,n} \rho_{nm} O_{mn} \tag{2.4}$$

$\overline{\langle \hat{O} \rangle}$ merupakan rata-rata ensemble dan ρ_{nm} adalah $\sum_{S=1}^N p_S C_m^{S*}(t) C_n^S(t)$. Persamaan tersebut mewakili elemen matriks dari operator $\hat{\rho}$

$$\hat{\rho} = \sum_{S=1}^N p_S |\Psi(\mathbf{r}, t)\rangle \langle \Psi(\mathbf{r}, t)| \tag{2.5}$$

dengan $\hat{\rho}$ merupakan operator *density* yang memuat informasi statistik dari keadaan campuran (*mixed state*). Elemen diagonal dari *density matrix* $\rho_{nn} = \overline{C_n^*(t) C_n(t)}$ disebut populasi dan menunjukkan probabilitas keadaan sistem, sedangkan elemen *off-diagonal* $\rho_{mn} = \overline{C_m^*(t) C_n(t)}$ menunjukkan koherensi keadaan antara level n dan m (Nugroho, 2016).

Untuk menggambarkan dinamika nilai ekspektasi, diperlukan evolusi waktu dari *density matrix* dan evolusi waktu fungsi keadaan diberikan oleh persamaan Schrodinger bergantung waktu.

$$i\hbar \frac{\partial |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle}{\partial t} = \hat{H} |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle \tag{2.6}$$

Evolusi waktu *density matrix* dapat diperoleh dari persamaan 2.5 yang diturunkan terhadap waktu.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = \dot{\hat{\rho}} = \sum_s p_s \left(\frac{\partial |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle}{\partial t} \langle \Psi^S(\mathbf{r}, t)| \right. \\ \left. + |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle \frac{\partial \langle \Psi^S(\mathbf{r}, t)|}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Kemudian kedua ruas kanan dan kiri persamaan 2.6 masing-masing dikalikan dengan $-\frac{i}{\hbar}$

$$\begin{aligned} \left[i\hbar \frac{\partial |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle}{\partial t} = \hat{H} |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle \right] \times -\frac{i}{\hbar} \\ \frac{\partial |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \hat{H} |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Jika persamaan 2.8 disubstitusikan ke persamaan 2.7, diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\rho}} &= \sum_s p_s \left(-\frac{i}{\hbar} \hat{H} |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle \langle \Psi^S(\mathbf{r}, t)| + |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle \langle \Psi^S(\mathbf{r}, t)| \right. \\ &\quad \left. - \frac{i}{\hbar} \hat{H} \right) \\ &= -\frac{i}{\hbar} \sum_s p_s (\hat{H} |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle \langle \Psi^S(\mathbf{r}, t)| - |\Psi^S(\mathbf{r}, t)\rangle \langle \Psi^S(\mathbf{r}, t)| \hat{H}) \\ &= -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}] \end{aligned} \quad (2.9)$$

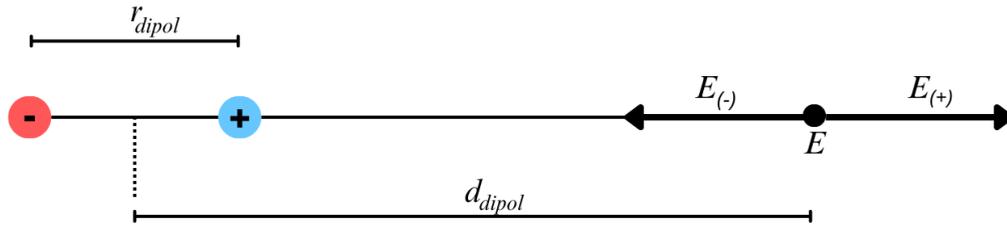
Tanda kurung persegi pada persamaan 2.9 menotasikan komutator, yang berarti $[\hat{H}, \hat{\rho}] = \hat{H}\hat{\rho} - \hat{\rho}\hat{H}$. Persamaan 2.9 ini dikenal dengan persamaan Liouville-von Neumann. Dengan menambahkan fenomena redaman, persamaan *density matrix* dapat dituliskan dengan persamaan

$$\dot{\rho}_{mn} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}]_{mn} - \gamma_{mn} (\rho_{mn} - \rho_{mn}^{eq}) \quad (2.10)$$

dengan γ_{mn} merupakan konstanta redaman (Nugroho, 2016).

2.4 Medan Listrik Akibat Dipol Listrik

Dipol listrik adalah dua buah muatan listrik berlawanan jenis dengan besar muatan yang sama dan terpisah oleh jarak yang kecil. Momen dipol listrik besarnya merupakan hasil kali besar muatan dan jarak antar dua muatan tersebut.



Gambar 2.4 Dipol listrik dan medan yang diakibatkan oleh adanya dipol listrik
Medan listrik yang dihasilkan pada suatu titik akibat adanya dipol listrik seperti pada Gambar 2.4 dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 E &= E_{(+)} - E_{(-)} \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_{(+)}^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_{(-)}^2} \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(d_{dipol} - \frac{1}{2}r_{dipol}\right)^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(d_{dipol} + \frac{1}{2}r_{dipol}\right)^2} \\
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0 d_{dipol}^2} \left\{ \left(1 - \frac{r_{dipol}}{2d_{dipol}}\right)^{-2} - \left(1 + \frac{r_{dipol}}{2d_{dipol}}\right)^{-2} \right\} \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

$E_{(+)}$ merupakan medan listrik yang diakibatkan oleh adanya muatan positif dan $E_{(-)}$ merupakan medan listrik yang diakibatkan oleh adanya muatan negatif. $r_{(+)}$ dan $r_{(-)}$ adalah jarak dari muatan positif dan negatif ke medan yang dihasilkan. Karena $d_{dipol} \gg r_{dipol}$, persamaan 2.11 dapat ditulis menjadi

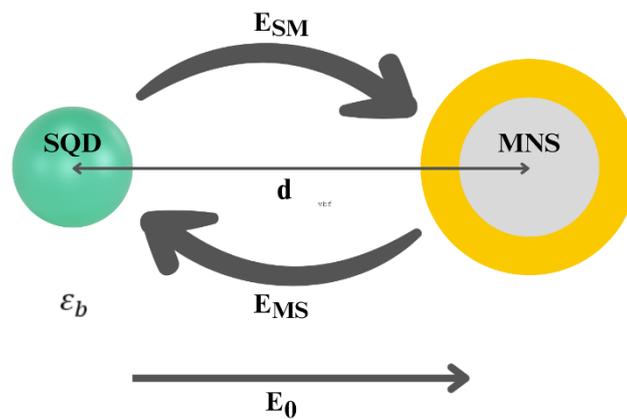
$$\begin{aligned}
 E &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0 d_{dipol}^2} \left(\frac{2r_{dipol}}{d_{dipol}} \right) \\
 &= \frac{qr_{dipol}}{2\pi\epsilon_0 d_{dipol}^3} \\
 &= \frac{p}{2\pi\epsilon_0 d_{dipol}^3} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

dengan q merupakan besar muatan listrik dan p merupakan momen dipol listrik. Pada persamaan 2.12, dapat dilihat bahwa besar medan listrik yang dirasakan di suatu titik dengan jarak d_{dipol} dari pusat dipol listrik akan semakin berkurang jika jaraknya semakin jauh dari pusat dipol listrik atau d_{dipol} semakin besar.

2.5 Interaksi SQD-MNS Hybrid

Kombinasi struktur nano dari logam dan semikonduktor memungkinkan munculnya sifat unik yang diakibatkan adanya interaksi diantara keduanya. Pada sistem *hybrid* SQD-MNS, ketebalan *shell* serta komposisi kimia dari MNS mempengaruhi karakteristik nanopartikel tersebut (Naeimi *et al.*, 2019). Ketika kopling antara dua nanopartikel cukup kuat, *self-action* dari nanopartikel tersebut dapat menghasilkan respon bistabilitas optik (Malyshev and Malyshev, 2011).

Dampak dari interaksi antara *exciton* dan *plasmon* pada sistem SQD-MNS *hybrid* dapat diamati melalui besarnya amplitudo medan total SQD karena kehadiran MNS. Interaksi antara SQD dan MNS dilakukan dengan pendekatan dipol-dipol. Secara skematis, interaksi antara medan SQD dan MNS ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Skema interaksi antara medan SQD dan MNS.

Ketika medan eksternal mengenai SQD, SQD akan terpolarisasi dan menghasilkan medan E_{SM} pada MNS. Berdasarkan persamaan 2.12, medan yang bekerja pada MNS oleh SQD, E_{SM} , dapat ditulis dalam bentuk:

$$E_{SM} = \frac{p_{SQD}}{2\pi\epsilon_0\epsilon_b d^3} \quad (2.13)$$

Selain polarisasi SQD yang menghasilkan medan E_{SM} , MNS yang terpolarisasi karena adanya E_{SM} juga menghasilkan medan E_{MS} . Medan yang dihasilkan MNS pada SQD memiliki bentuk seperti persamaan 2.13, tetapi p_{SQD} diganti menjadi p_{MNS} . Momen dipol MNS p_{MNS} ditentukan oleh medan totalnya $E_0 + E_{SM}$.

$$p_{MNS} = \varepsilon_0 \varepsilon_b \alpha(\omega) \left(E_0 + \frac{p_{SQD}}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_b d^3} \right) \quad (2.14)$$

Oleh karena itu, medan yang dihasilkan oleh MNS pada SQD adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} E_{MS} &= \frac{p_{MNS}}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_b d^3} \\ &= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_b \alpha(\omega) E_0}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_b d^3} + \frac{\left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_b \alpha(\omega) p_{SQD}}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_b d^3} \right)}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_b d^3} \\ &= \frac{\alpha(\omega) E_0}{2\pi d^3} + \frac{\alpha(\omega) p_{SQD}}{4\pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon_b d^6} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Medan total yang dirasakan oleh SQD adalah $E_0 + E_{MS}$. Namun, medan ini ternormalisasi oleh konstanta dielektrik efektif SQD, ε'_s . Oleh karena itu, medan total pada SQD dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} E_{SQD} &= \frac{1}{\varepsilon'_s} (E_0 + E_{MS}) \\ &= \frac{1}{\varepsilon'_s} E_0 + \frac{1}{\varepsilon'_s} \frac{\alpha(\omega) E_0}{2\pi d^3} + \frac{1}{\varepsilon'_s} \frac{\alpha(\omega) p_{SQD}}{4\pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon_b d^6} \\ &= \frac{1}{\varepsilon'_s} \left(1 + \frac{\alpha(\omega)}{2\pi d^3} \right) E_0 + \frac{\alpha(\omega)}{4\pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon_b \varepsilon'_s d^6} p_{SQD} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Persamaan 2.16 menunjukkan adanya dua efek yang terjadi pada SQD akibat adanya MNS. Pada suku pertama, dapat dilihat adanya peningkatan amplitudo medan pengeksitasi E_0 . Suku kedua menunjukkan adanya *self-action* pada SQD akibat adanya MNP. Pada suku ini, terlihat bahwa medan yang dirasakan SQD mengandung momen dipolnya sendiri, p_{SQD} . Hal ini menggambarkan interaksi *self-action* (Nugroho, 2016).

2.6 Spektrum Serapan

Pada saat SQD atau MNS berinteraksi dengan cahaya, interaksi tersebut akan menghasilkan penyerapan cahaya. Spektrum serapan dari suatu material digambarkan sebagai fraksi medan energi yang diserap oleh material pada suatu

rentang frekuensi. Energi yang diserap per satuan volume oleh dipol yang diinduksi pada material dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$Q_{SQD(MNS)} = \langle \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \rangle_{waktu} \quad (2.17)$$

Tanda kurung siku pada persamaan 2.17 melambangkan waktu rata-rata, \vec{P} adalah polarisasi listrik (momen dipol listrik per satuan volume), dan \vec{E} adalah medan listrik. Karena polarisasi berhubungan dengan medan listrik $\vec{P}(t) = \epsilon_0 \chi_E \vec{E}(t)$, maka untuk menyederhanakan, \vec{E} dan \vec{P} diasumsikan paralel satu sama lain, sehingga persamaan 2.17 dapat dituliskan menjadi

$$\begin{aligned} Q_{SQD(MNS)} &= \langle \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \rangle_{waktu} \\ &= \langle \frac{1}{4} (E e^{-i\omega t} + c.c) (i\omega \epsilon_0 \chi_{SQD(MNS)} E e^{-i\omega t} + c.c) \rangle_{waktu} \\ &= \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \text{Im}(\chi_{SQD(MNS)}) |E|^2 \end{aligned} \quad (2.18)$$

dengan $\vec{E}(t)$ dan $\vec{P}(t)$ adalah medan listrik dan polarisasi yang bervariasi secara sinusoidal, sedangkan E merupakan amplitudo kompleks medan listrik dan $c.c$ menunjukkan konjugat kompleksnya (Yariv, 1991). χ adalah suseptibilitas material, sehingga dari persamaan 2.18 dapat diketahui bahwa untuk menghitung daya serapan dibutuhkan bagian imajiner dari suseptibilitas material.

Suseptibilitas dari SQD dihitung dengan memanfaatkan persamaan *density matrix*. Polarisasi SQD dihitung sebagai momen dipol per satuan volume.

$$P_{SQD} = \frac{1}{V_{SQD}} \langle \hat{\mu} \rangle \quad (2.19)$$

Momen dipol SQD dihitung menggunakan elemen *off-diagonal* dari *density matrix*.

$$\langle \hat{\mu} \rangle = \text{Tr}(\hat{\rho} \hat{\mu}) \quad (2.20)$$

Sehingga polarisasi SQD dapat dituliskan sebagai berikut.

$$P_{SQD} = \frac{1}{V_{SQD}} (\rho_{12} \mu + \rho_{21} \mu) \quad (2.21)$$

Karena bentuk polarisasi SQD terdiri dari amplitudo polarisasi P_0 dan fungsi waktu

$$\begin{aligned} P_{SQD} &= P_0 \cos(\omega t) \\ &= \frac{1}{2} (P_0 e^{-i\omega t} + P_0 e^{i\omega t}) \end{aligned} \quad (2.22)$$

maka dengan mensubstitusikan persamaan 2.22 ke persamaan 2.21, persamaan 2.21 dapat dituliskan menjadi

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (P_0 e^{-i\omega t} + P_0 e^{i\omega t}) &= \frac{1}{V_{SQD}} (\rho_{12}\mu + \rho_{21}\mu) \\ \frac{1}{2} (P_0 e^{-i\omega t} + P_0 e^{i\omega t}) &= \frac{1}{V_{SQD}} \left(\frac{i}{2} R^* e^{i\omega_0 t} \mu - \frac{i}{2} R e^{-i\omega_0 t} \mu \right) \\ P_0 &= -\frac{i}{V_{SQD}} R \mu \end{aligned} \quad (2.23)$$

dan karena polarisasi berhubungan dengan medan listrik, $P_0 = \varepsilon_0 \chi E_0$, suseptibilitas SQD dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 \chi E_0 &= -\frac{i}{V_{SQD}} R \mu \\ \chi &= -\frac{i}{V_{SQD} \varepsilon_0 E_0} R \mu \end{aligned} \quad (2.24)$$

Karena suseptibilitas, χ , bernilai kompleks, maka pada suseptibilitas terdapat nilai riil dan imajiner, $\chi = \chi_R + i\chi_i$. Bagian imajiner dari suseptibilitas ini dibutuhkan untuk menghitung daya serapan SQD seperti yang telah dituliskan pada persamaan 2.18.

Suseptibilitas MNS dihitung dari polarisabilitasnya. Polarisasi MNS dihitung sebagai momen dipol per satuan volume.

$$P_{MNS} = \frac{p}{V_{MNS}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_b \alpha(\omega) E}{V_{MNS}} \quad (2.25)$$

Karena $P_0 = \varepsilon_0 \chi E_0$, maka

$$P_{MNS} = \varepsilon_0 \chi_{MNS} E. \quad (2.26)$$

Oleh karena itu, suseptibilitas MNS dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\chi_{MNS} = \frac{\varepsilon_b \alpha(\omega)}{V_{MNS}} \quad (2.27)$$