

20a-F7-2

金属ナノ構造中の局在プラズモン励起による光放射の理論

Theory of light emission by localized plasmon excitation in metal nanostructures

東大院工 〇市川 昌和

Department of Applied Physics, Univ. Tokyo, 〇Masakazu Ichikawa

E-mail: ichikawa@ap.t.u-tokyo.ac.jp

金属ナノ構造中に励起される局在プラズモンによる光放射現象は、プラズモニクス分野において中心的な役割を果たす現象である[1]。本発表では、我々の局在プラズモンに関する理論[2]を展開させた局在プラズモン励起による光放射に関する理論について報告する。

電磁場の遅延効果を考慮したとき、Random Phase 近似(RPA)および高周波数（プラズモン周波数領域）近似において、有効電場ポテンシャル $\varphi_{\text{eff}}(\mathbf{r}, \omega)$ と外部電場ポテンシャル $\varphi_{\text{ext}}(\mathbf{r}, \omega)$ は、電子密度を $n_0(\mathbf{r})$ とすると、以下の方程式を満たす[3]。

$$\begin{aligned}\varphi_{\text{eff}}(\mathbf{r}, \omega) &= \varphi_{\text{ext}}(\mathbf{r}, \omega) - \frac{e^2}{m\omega^2} \int d\mathbf{r}_1 G_0(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1, \omega) \nabla_1 \cdot [n_0(\mathbf{r}_1) \nabla_1 \varphi_{\text{eff}}(\mathbf{r}_1, \omega)] \\ &= \varphi_{\text{ext}}(\mathbf{r}, \omega) + \int d\mathbf{r}_1 G_0(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1, \omega) \rho(\mathbf{r}_1, \omega), \quad \because \rho(\mathbf{r}_1, \omega) \equiv -\frac{e^2}{m\omega^2} \nabla_1 \cdot [n_0(\mathbf{r}_1) \nabla_1 \varphi_{\text{eff}}(\mathbf{r}_1, \omega)]\end{aligned} \quad -- (1)$$

ここで、 $G_0(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1, \omega)$ は下記の Helmholtz の方程式を満たし、以下のように与えられる。

$$\left(\nabla_{\mathbf{r}}^2 + \frac{\omega^2}{c^2} \right) G_0(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1, \omega) = -4\pi\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1), \quad G_0(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1, \omega) = \frac{\exp(i\omega/c \cdot |\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|}$$

(1)式中の $\rho(\mathbf{r}_1, \omega)$ は、金属ナノ構造中の誘起電荷密度と見なせるので、金属ナノ構造の電気双極子モーメント $\mathbf{P}(\omega)$ と、その時間に関する 2 階微分 $\ddot{\mathbf{P}}(\omega)$ は、以下のようにになる。

$$\begin{aligned}\mathbf{P}(\omega) &= \int d\mathbf{r}_1 \rho(\mathbf{r}_1, \omega) \mathbf{r}_1 = -\frac{e^2}{m\omega^2} \int d\mathbf{r}_1 \nabla_1 \cdot [n_0(\mathbf{r}_1) \nabla_1 \varphi_{\text{eff}}(\mathbf{r}_1, \omega)] \mathbf{r}_1 = \frac{e^2}{m\omega^2} \int d\mathbf{r}_1 n_0(\mathbf{r}_1) \nabla_1 \varphi_{\text{eff}}(\mathbf{r}_1, \omega) \mathbf{r}_1, \\ \ddot{\mathbf{P}}(\omega) &= -\frac{e^2}{m} \int d\mathbf{r}_1 n_0(\mathbf{r}_1) \nabla_1 \varphi_{\text{eff}}(\mathbf{r}_1, \omega) \mathbf{r}_1\end{aligned} \quad -- (2)$$

電磁気学における電気双極子モーメントによる光放射の公式から、遠隔場 ($\propto 1/r$) の光放射強度の周波数スペクトルの放射角依存性 $\mathbf{I}(\theta, \phi, \omega)$ は、動径 $\mathbf{r}$ 方向の単位ベクトルを $\mathbf{i}_r$ とすると、

$$\mathbf{I}(\theta, \phi, \omega) = \frac{\mathbf{i}_r}{4\pi^2 c^3 \hbar \omega} \left| \mathbf{i}_r \times \ddot{\mathbf{P}}(\omega) \right|^2 \quad -- (3)$$

となる。当日は、上記理論の詳細と、ナノスケール金属球への平面電磁場の照射時及び電子線の入射時の局在プラズモン励起による光放射強度の周波数スペクトルに関して報告する。

参考文献：

- [1] F. J. Garcia de Abajo, Rev. Mod. Phys. **82**, 209 (2010).
- [2] M. Ichikawa, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 044606 (2011).
- [3] 市川昌和、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、6.5 表面物理・真空、18a-P2-1 (2013).