非対称ブルズアイ光共振器内に埋め込まれた量子井戸の 光吸収増強に関する理論解析

Theoretical Analysis of Light Absorption Enhancement of a Quantum Well Embedded in an Asymmetric Bull's-eye Cavity

東京大学¹,[○]池 尚玟¹,岩本 敏¹ Univ. Tokyo¹, [○]S. Ji and S. Iwamoto¹

Email: smji@iis.u-tokyo.ac.jp

その構造から偏光に依存しない応答を示し得るブルズアイ共振器は、単一光子の偏光状態と物 質中の電子スピン状態をお互い変換する量子メディア変換の高効率化を可能にする光共振器とし ての応用が期待できる。我々は、GaAs 量子井戸(QW)中に形成されたゲート制御型量子ドット (QD)[1]を用いた高効率量子インターフェースの実現を目指し、QDの光子吸収効率を入射光子の 偏光に依存せず向上することができるブルズアイ光共振器を設計し[2]、その原理実証実験に成功 している[3]。今回、共振器が形成されるスラブと基板との間の空気層の厚さを調整[4]すること で、さらなる光吸収効率の増強が可能であることがわかったので報告する。この結果は、DBR[5] や埋め込みミラー[6]などの複雑な構造を用いずに光吸収効率の向上が可能であることを示すもの であり、ゲート制御型 QD を用いた量子インターフェースの高効率化への応用が期待できる。

図 1(a) に QW 層 (光吸収レート γ_{abs})を含んだ非対 称ブルズアイ共振器の模式図を示す。共振器はゲート 制御型 QD 形成のための電極作製およびエアブリッジ 構造を可能にするチャネルが設けられている [3]。ス ラブから T_{gap} 離れた位置にある基板によって全体と しては上下非対称な共振器となっており、共振器光子 の上下方向への減衰レート γ_t および γ_b にアンバラン スが生じる。ここで、ゲート制御型 QD の面積を S_{QD} とすると、共振器共鳴波長 λ₀ で上部から入射した光 に対する QD の光吸収効率は次式によって表せる。

 $P_{\rm abs}^{\rm QD} = \frac{4\gamma_{\rm abs}\gamma_{\rm t}}{(\gamma_{\rm abs} + \gamma_{\rm t} + \gamma_{\rm b})^2} \cdot \eta \cdot \frac{S_{\rm QD}}{S_{\rm eff}}$

ここで η , S_{eff} は遠方界における入射光と共振器モードの空間的な重なり具合、共振器モードの空間的な局 在強度を表す(定義は [2] を参照)。図 1(b) は T_{gap} の 関数として上式および 3 次元数値計算により光吸収効 率を評価した結果である。凡そ半波長を周期に最大値 を持つことが分かる。別途求めた共振器と基板の間を 往復する際に蓄積する位相量 $\Delta \phi$ が、最大(最小)効 率の時に同相(逆相)の条件を満たしていることから、 基板での反射光に起因する干渉効果の結果であること がわかる [7]。位相整合時($T_{\text{gap}} = 0.4\lambda_0$)の効率は基 板を考慮しない際に比べて 1.6 倍程度向上している。



Fig. 1. (a) Schematic of an asymmetric bull's-eye cavity embedding an absorptive QW. (b) Absorption efficiency P_{abs}^{QD} as a function of T_{gap} . Black curve and circles represent the results obtained by the equation in the main text and by 3D-FDTD, respectively. Black dashed line represents the absorption efficiency calculated by 3D-FDTD for the free-standing cavity without the substrate. Red line shows the accumulated phase after a round trip in the air gap and a half of the slab.

参考文献) [1] A. Oiwa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 011008 (2017). [2] S. Ji *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 102003 (2021). [3] S. Ji *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SC1018 (2023). [4] 周 潔鈺 他, in 第 83 回秋季応物物理学会 (2022), 21a-A101-8. [5] A. Musial *et al.*, Appl. Phys. Lett. **118**, 221101 (2021). [6] L. Rickert *et al.*, Opt. Express **27**, 36824 (2019). [7] S.-H. Kim *et al.*, Phys. Rev. B **73**, 235117 (2006). 謝辞) 本研究は JST CREST (JPMJCR15N2) および科研費・基盤 S (22H04962) により遂行された。