

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03705

研究課題名（和文）半導体薄膜による量子もつれ光子対生成：最適な膜厚の探索と共振器効果の理論的研究

研究課題名（英文）Generation of Entangled Photon Pairs from a Semiconductor slab: A Theoretical Study on Optimal Slab Width and Microcavity Effects

研究代表者

安食 博志 (Ajiki, Hiroshi)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：60283735

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、共振器-薄膜系における励起子分子からの量子もつれ光子対の生成について理論的に調べた。強結合領域では、量子もつれ光子対の生成過程の中間状態は励起子と光子の2量子分の結合状態（2励起ドレスト状態）である。そこで、励起子分子から2励起ドレスト状態への遷移確率の各種パラメータ依存性を計算し、遷移確率が高くなる条件を調べた。励起子分子は表面励起子ポラリトンへ遷移した場合、量子もつれ光子対として取り出すことが難しい。そこで、共振器がある場合の表面ポラリトンの状態を計算した。その結果、共振器のQ値が高くなると、表面ポラリトンへの遷移が強く抑制されることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子情報処理技術の実用化に向けて様々な量子もつれ状態が提案されているが、量子もつれ光子対は環境からの影響が極めて小さい点に長所がある。もつれ光子対の実験の多くは量子ドットを利用しているが、光と物質系の相互作用が強くなる薄膜、さらにはこれを共振器に埋め込んだ系により、効率よくもつれ光子対を生成できると考えられる。本研究では、共振器-薄膜系に特有なドレスト状態を経て励起子分子から量子もつれ光子対が生成される過程を理論的に考察し、量子もつれ光子対の生成に不利な表面ポラリトンへの遷移が、共振器により強く抑制されることを明らかにした点で意義がある。

研究成果の概要（英文）：We theoretically investigate the generation of quantum entangled photon pairs from a biexciton in a slab embedded in a microcavity. In the strong coupling regime, the intermediate states in the generation process are exciton-photon coupled states called two-excited dressed states. We have calculated the transition probability from the biexciton to the two-excited dressed state under various parameters and investigated the conditions under which the transition probability becomes high.

When a biexciton radiatively decays to a surface polariton, it is difficult to extract an entangled photon pair. Therefore, we have investigated the surface polariton in the presence of a cavity. It is found that the transition to the surface polariton is strongly suppressed in a high-Q cavity.

研究分野：光物性理論

キーワード：量子もつれ光子対 励起子分子 表面励起子ポラリトン 薄膜 ドレスト状態 励起子

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子もつれ光子対は量子暗号や量子コンピューティングなどの応用で極めて重要な役割を果たす。そのため、現在、高効率で高速な量子もつれ光子対を生成する研究開発が世界中で行われている。特に、量子ドット中の励起子分子による量子もつれ光子対の研究が最も進んでおり、光子対の生成に成功した例も多数ある。半導体サイズの大きい方がもつれ光子対の生成効率が高いと考えられるが、小型デバイスとしては薄膜が適している。しかし、薄膜を用いたもつれ光子対の生成例は、残念ながらまだない。これは、薄膜によるもつれ光子対の生成について、十分な理解がまだ得られていないためである。

我々は、薄膜中の励起子分子によるもつれ光子対生成の研究を進める過程で、有限系に閉じ込められた励起子と光の結合状態を求めることに成功し、励起子分子から表面ポラリトンへの遷移確率の計算を可能にした。実際にこの計算手法により、薄膜中の励起子分子の輻射寿命の膜厚依存性を計算し、実験における特徴的な膜厚依存性が表面ポラリトンへの輻射崩壊から説明できることを示した。この表面ポラリトンは、薄膜表面に局在した状態なので量子もつれ光子対として利用することは難しい。つまり、表面ポラリトンへの遷移はもつれ光子対の生成効率を調べる上で非常に重要である。

量子もつれ光子対を高効率に生成するためには光と物質系の相互作用を強くすることが重要である。そのような系として光共振器は古くから着目されている。共振器により、励起子分子からの量子もつれ光子対の生成効率のどの程度向上するのか、興味深い問題として残されている。

2. 研究の目的

本研究では、共振器に埋め込んだ半導体薄膜の励起子分子を介したもつれ光子対の生成効率を理論的に明らかにすることである。共振器中の光子と励起子の相互作用は非常に大きく、1光子レベルでラビ分裂(真空ラビ分裂)が観測される。つまり、励起子分子からの輻射崩壊の遷移先としてドレスト状態(励起子と光子の結合状態)を考慮する必要がある。また、共振器中では、強い光と励起子の相互作用により表面励起子ポラリトンの状態も共振器がない場合と比較して異なる。このように励起子分子の輻射崩壊の遷移確率、すなわち量子もつれ光子対の生成効率は共振器により大きく変化する。

3. 研究の方法

(1) 共振器-薄膜系による量子もつれ光子対の生成過程

半導体薄膜の膜厚は、励起子や励起子分子の相対運動の波動関数の広がり比べて十分大きいとした。励起子分子の相対運動の波動関数はガウス関数を仮定し、これを用いた励起子分子の相対座標の期待値が実験による励起子分子の半径と一致するように、励起子分子の波動関数のパラメータを決定した。

共振器中の光は最低モードのみ考慮し、そのエネルギーは励起子の最低エネルギー付近となるように共振器長を設定した。半導体薄膜は共振器の中央に配置する。薄膜中の励起子は厚さ方向に離散的な波数をとるが、最低モードの共振器光と最も強く相互作用する最低波数の励起子のみ考えた。面内方向の共振器光と励起子の重心運動の波数は連続である。この系において共振器モードの電磁場を量子化し、励起子と共振器モードの光子との相互作用を求めた。

励起子分子はその中の1組の電子と正孔が消滅し、1個の光子を放出することにより崩壊する。強結合領域の共振器-薄膜系では、光子が共振器の外に出るまでに、放出された1光子の励起子への再吸収や励起子から1光子の再放出が繰り返される。つまり、励起子分子が崩壊した後の重ね合わせ状態には、2光子の状態、1光子1励起子の状態、2励起子の状態が含まれている。この重ね合わせ状態を2励起ドレスト状態と呼ぶことにする。一方、励起子分子は弱結合領域にあるとし、崩壊した励起子分子が再び生成されることはないとする。実際、励起子分子のラビ分裂はこれまで観測されていない。

以上により、励起子分子による量子もつれ光子対の中間状態は2励起ドレスト状態である。そこで、2励起ドレスト状態を計算し、これを用いて励起子分子から2励起ドレスト状態への単位時間あたりの遷移確率をフェルミの黄金則から計算した。

(2) 共振器表面励起子ポラリトンの分散関係

表面励起子ポラリトンの共振器効果については、共振器の内外に広がる連続波数の電磁場のモード（グローバルモード）が必要となる。そこで、1次元の共振器のモデルとして2枚のデルタ関数型ミラーを導入し、電磁場のグローバルモードを解析的に求めた。共振器の中央に配置した薄膜中の励起子は膜厚方向に最低波数をもつ状態のみ考慮した。面内波数は並進対称性のため保存するので、面内波数ごとに表面励起子ポラリトンの状態を電磁場のグローバルモード（連続状態）と励起子（離散状態）の固有エネルギーをFanoの方法で解いた。

4. 研究成果

(1) 共振器-薄膜系による量子もつれ光子対の生成過程

励起子分子を介した量子もつれ光子対生成の中間状態は2励起ドレスト状態である。本研究では、励起子分子から2励起ドレスト状態への遷移確率を計算し、量子もつれ光子対の生成効率を高くするための条件の一部を理論的に調べた。

図1は、2励起ドレスト状態の分散関係を示している。面内方向の重心波数 \mathbf{K} の励起子分子が輻射崩壊すると相対波数が $(\mathbf{K}/2 + \mathbf{k})$ と $(\mathbf{K}/2 - \mathbf{k})$ の2個の2励起ドレスト状態へと遷移する。横軸の波数はこの相対波数である。2励起ドレスト状態は1個の「2励起子状態」、2個の「1励起子1光子状態」、1個の「2光子状態」の4個の状態の重ね合わせ状態で表されるため、4個の分散関係があらわれる。相互作用がない場合の4個の状態の分散関係は点線で表されている。励起子と共振器モードの光子の強い相互作用によるレベル反発が見られる。

励起子分子のエネルギーを $1.99E_{ex}$ とした場合の、遷移先の2励起ドレスト状態の相対波数（等エネルギー線）を図2にプロットしている。色は、図1の2励起ドレスト状態のブランチの色と対応している。一番下のブランチ（緑）の2励起ドレスト状態の相対波数が最も大きい。励起子分子の重心波数をより大きくしていくと、遷移先の最低準位のドレスト状態の相対波数はより大きくなり、2個の等エネルギー線に分離する。また、励起子のエネルギーと面内波数が0の共振器モードのエネルギーの比（離調）を変えても、遷移先の2励起ドレスト状態の等エネルギー線は変化する。

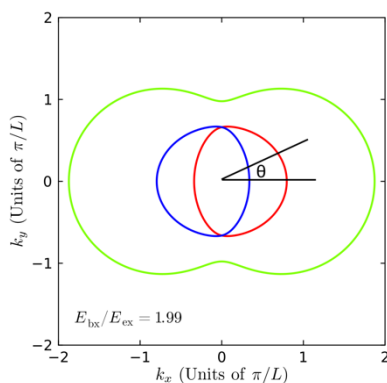


図2. 励起子分子から遷移可能な2励起ドレスト状態の相対波数 (k_x, k_y) .

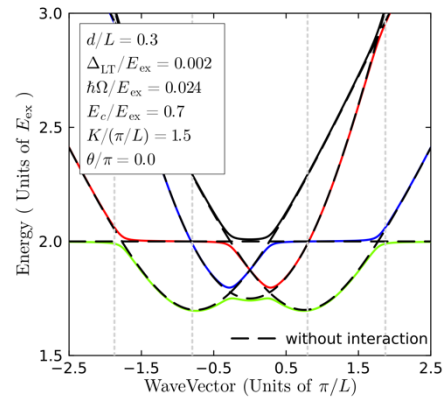


図1. 2励起ドレスト状態の分散関係. d は薄膜の膜厚, L は共振器長, Δ_{LR} は励起子の縦横分裂エネルギー, E_{ex} は励起子のエネルギー, $\hbar\Omega$ は励起子と光子の相互作用の大きさ, E_c は面内波数0の共振器モードのエネルギー, K は重心波数のエネルギー, θ は重心波数と相対波数（横軸）の間の角度を表している（図2を参照）。

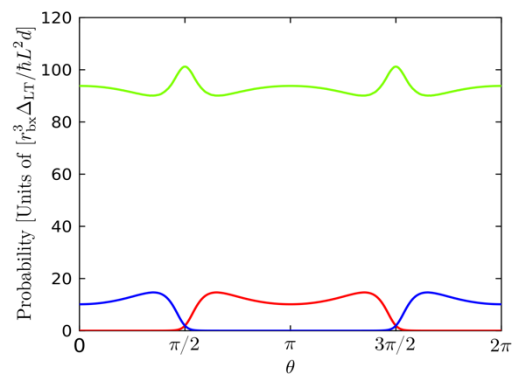


図3. 励起子分子から2励起ドレスト状態への遷移確率の相対波数の方向依存性。

図3は励起子分子から2励起ドレスト状態への遷移確率を示している。横軸は重心波数ベクトルの方向から測った遷移先の相対波数ベクトル角度であり、重心波数から90度の方向で遷移確率が高くなっていることがわかる。ただし、その角度依存性はそれほど大きくない。この遷移確率は、遷移行列要素の絶対値2乗と2励起ドレスト状態の状態密度に比例する。遷移行列要素はどのブランチでも同程度の大きさであるが、状態密度が一番下のブランチが約4倍程度大きく、一番下のブランチへの遷移確率が顕著に大きいのは、状態密度大きいためである。

(2) 共振器表面励起子ポラリトンの分散関係

共振器がある場合の光のグローバルモードを解析的に計算するため、以下のような δ 関数型ミラーでモデル化した共振器を考える。

$$\epsilon(z) = 1 + \kappa\delta\left(z + \frac{1}{2}L\right) + \kappa\delta\left(z - \frac{1}{2}L\right)$$

ここで、 κ が大きいほどミラーの反射率は大きくなり、共振器の Q 値も高くなる。図 4 は、平面波の光を入射した場合の共振器の中央（薄膜の中央）における光電場強度の波数依存性を示している。共振器がない場合、光電場強度は波数によらず一定であるが、共振器がある場合は共振器モードの波数で共鳴的に光電場強度が増強する。このことは、薄膜における表面励起子ポラリトンの状態に大きな影響を与えることを強く示唆している。

共振器がある場合の表面励起子ポラリトンの分散関係を図 5 に示す。黒の実線は共振器がない場合の表面ポラリトンの分散関係である。平らな分散関係から光子の分散関係につながる曲がった分散関係にある表面ポラリトンは、励起子状態と光子状態が同程度の割合で重ね合わせられた状態である。そのため、この状態は励起子分子からの遷移振幅が高くなり、量子もつれ光子対の生成効率を低下させてしまう。共振器がある場合、この分散関係が曲がる波数領域が κ (Q 値) が大きくなるとともに狭くなり、 $\kappa = 0.5$ 程度以上になると曲がった領域がほとんどなくなる。つまり、励起子分子から表面ポラリトンへの遷移確率が強く抑制され、量子もつれ光子対の生成を高くする効果があると言える。

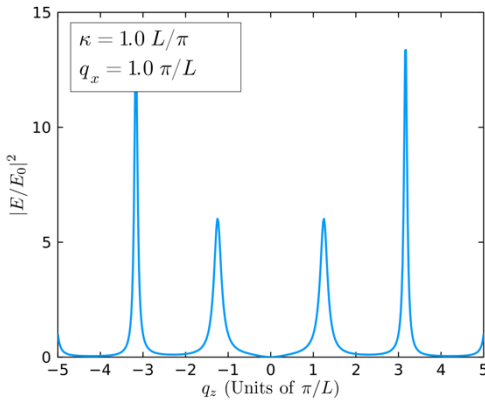


図 4. 共振器の中央における光電場強度の波数（ミラーに垂直な方向）依存性. q_x は面内方向の波数.

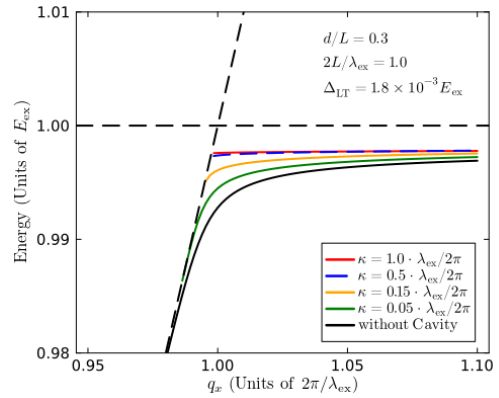


図 5. 共振器表面励起子ポラリトンの分散関係. 点線は光子の分散関係と励起子の分散関係. 共振器がない場合の表面ポラリトンの分散関係は黒の実線でプロットしている. さまざまな κ (共振器の Q 値に対応) で計算した.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 安食博志
2. 発表標題 共振器中の表面励起子ポラリトン
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三宅伸哉, 安食博志
2. 発表標題 共振器-半導体薄膜系による量子もつれ光子対の状態と生成効率
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 安食博志
2. 発表標題 共振器 - 薄膜系における表面励起子ポラリトンの分散関係と状態
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 板東叙明, 安食博志
2. 発表標題 光と励起子の相互作用の強さと発光スペクトル形状の関係
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------