

平成 30 年度 卒業論文
空洞量子電磁力学実験のための
マイクロ波空洞共振器の設計

小松 優基

2019 年 2 月 19 日

目次

第 1 章	序論	3
1.1	研究背景	3
1.1.1	量子コンピューターの課題	3
1.1.2	ジョセフソン接合	3
1.1.3	固有ジョセフソン接合	3
1.2	予備知識	4
1.2.1	マイクロ波空洞共振器	4
1.2.2	空洞量子電磁力学実験	5
第 2 章	研究目的	6
2.1	昨年度の研究成果	6
2.2	昨年度の課題	6
2.2.1	共振周波数の調整方法	6
2.2.2	外界との結合方法	6
2.2.3	試料の設置位置が不明瞭	6
2.3	本研究の目的	7

論文概要

提出日 2019 年 2 月 20 日

専攻 物理・数理学科

指導教員 北野 晴久教授

学籍番号 15115062

氏名 小松優基

論文題目 空洞量子電磁力学実験のためのマイクロ波空洞共振器の設計

論文要旨

量子コンピューターに使われる量子ビットの有力候補の一つに「超伝導回路」によるものがある。超伝導回路ではジョセフソン接合を用いて量子もつれ状態を実現しているが、情報の保存時間であるコヒーレンス時間が現在数十マイクロ秒程度であり、0.1K 以下の極低温下でしか動作しないなどの課題も多い。北野研究室では、2015 年度の結果から、固有ジョセフソン接合 (IJJ) 素子の高次スイッチ現象において、41.5GHz のマイクロ波照射下でスイッチング電流分布の二重ピーク構造が観測され、離散化したエネルギー準位の形成が示唆された。前述の課題解決に向けて高温超伝導体の IJJ を用いた超伝導量子ビットの実現を目指し、本研究では、40 GHz における、空洞量子電磁力学実験 (cavity QED) を行うためのマイクロ波空洞共振器の設計を電磁界解析シュミレータ (MW-Studio, CST 社) を用いて行った。本研究では、同軸ケーブルとの結合を考慮し 37.51GHz で共振周波数を変化させる機能を持った共振器の設計ができた。今後の課題として、より高い Q 値になるように、電磁場の結合方法を探していくことが必要となる。また、シミュレーションのみでは微小な試料を入れた際の応答までは計算できないため、実際に今回試したモデルを元に空洞共振器を試作し、共振器自体の特性を調査する必要がある。

第 1 章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 量子コンピューターの課題

近年、量子コンピューターが話題に上がることが多くなってきた。量子コンピューターは超並列計算機とも呼ばれ、因数分解、最適化計算に優れるため、同時に話題になっている AI（ディープラーニング）やビッグデータなどとの相性が良いことがその一因であることが考えられる。既に商用化された量子コンピュータもあるが、まだまだ課題は多い。量子コンピューターの動作原理である量子ビットには量子性を保ち制御できる仕組みが必要だが、現在それができる仕組みは多くなく、実用化に至るには様々な制約がある。その中で、最も有力だと言われているものが「超伝導回路」による量子ビットである。超伝導回路ではジョセフソン接合を用いて量子もつれ状態を実現しているが、情報の保存時間であるコヒーレンス時間が現在数十マイクロ秒程度であり、極低温下でしか動作しないなどの課題も多い。北野研究室では、その課題解決に向けて高温超伝導体の固有ジョセフソン接合 (IJJ: Intrinsic Josephson Junction) を用いた超伝導量子ビットの実現を目指している。

1.1.2 ジョセフソン接合

二つの超伝導体が弱く結合した接合をジョセフソン接合と呼ぶ。超伝導状態では、2つの電子が引力相互作用によりクーパー対を形成し、そのクーパー対の状態が巨視的な数重ね合わさり、一つの状態で記述することができるようになる。この状態を記述する関数を、巨視的波動関数と呼ぶ。ジョセフソン接合では2つの（巨視的波動関数の位相が）異なった超伝導体間に薄い絶縁体を挟むなどして弱く結合することにより、その2つの接合にトンネル電流が流れるという現象が見られる。

以下に模式図を示す。2つの超伝導体の位相差を $\Delta\theta$ とすると、そこに流れる超伝導電流は以下のように記述できる。

$$I = I_c \sin \Delta\theta$$

1.1.3 固有ジョセフソン接合

超伝導体となる物質の中には、その物質の内部に絶縁体と超伝導が非常に薄い層状に重なっている構造をもつものが存在する。そのような物質はその層間にジョセフソン接合があると視做することができる。これを固有ジョセフソン接合と呼ぶ。

以下にその例として、Bi2212 の構造を示す。

北野研究室では、前述したような固有接合の研究を行っており、その中でも本研究室の修士課程を卒業された高橋優作氏の研究結果を載せる。[引用つける]

Bi2212 という超伝導体の固有ジョセフソン接合素子にマイクロ波を照射した際にスイッチング確率の 2 重ピーク構造が観測された。このことからこの素子には離散化準位の形成があることが示された。このほかにも、北野研の過去の研究では 40GHz 程度の周波数のマイクロ波で、同様の離散化順位の形成が観測された。しかしこの固有ジョセフソン接合素子は、人口的に作成したジョセフソン素子とは異なり、実際に作成するまでどの程度のマイクロ波を照射すると離散化順位が形成されるのかわからない。素子の作成方法を工夫して、エネルギー順位を調整することは大変困難であるため、素子作成後にどの程度のエネルギー準位を有しているか調べるための方法が必要である。今回は空洞共振器を用いてその準位を調べることを目指す。

1.2 予備知識

1.2.1 マイクロ波空洞共振器

マイクロ波とは周波数が数 GHz から数十 GHz ほどの領域にある電磁波で、波長が電波より短く、遠赤外線より長い領域にある電磁波である。

一般に、高周波電流の流れている導体の周囲には電流を囲む円周方向に磁界 H 、あるいは磁束密度 $B = \mu H$ (μ は媒質の透磁率) の磁束が生じる。これは電磁気学におけるアンペールの法則として知られている現象である。この磁束は、電流の周波数によって変化するため、ファラデーの電磁誘導則より、磁束に垂直な方向に電界 E 、あるいは電束密度 $D = \epsilon E$ (ここで ϵ は媒質の誘電率) で与えられる時間的に変化する電束が生じる。このような電束の変化はそこに電流が流れていると同等に考えてよいため、再び新たな磁界が発生する。このようにして、伝搬していく波を電磁波と呼んでいる。電磁波は真空中でも伝搬する。

ある形状の管の中に音波を伝播させると特定の周波数で大きな音になる現象は共振現象と呼ばれ、管楽器など身近なところにも応用されている馴染みの深い現象であるが、マイクロ波でも同様な現象が起こる。

一般に金完全導体で閉じられた中空の箱にマイクロ波を照射すると、電磁場エネルギーが箱の中に蓄えられ、特定の周波数で電磁界振幅が増大する共振現象が起きる。この中空の箱のことを空洞共振器と呼び、共振したときの周波数を共振周波数と呼ぶ。一般に空洞共振器の共振周波数は、マクスウェル方程式の固有値解として与えられ、空洞の形や大きさに依存して複数の固有値を持つことが知られている。

前述したように、自由空間での電磁波は進行方向に対して、垂直な向きに電磁界が発生するため、TEM モード (TEM: *Transverse Electro - Magnetic Wave*, TEM 波とも) と呼ばれている。

一方で空洞共振器では、内部構造と周波数により、特定の方向に定在波ができるようなモードを持つ。簡単のため、導波管 (完全導体の中空の筒) でのモードを考える。導体壁で囲まれた導波管の中を電磁波が伝搬していく時には、導体面における境界条件 (電解は導体面に垂直、磁界は平行) を満たすためには、TEM 波では不可能である。進行方向を z とすると、電解の進行方向成分はゼロ ($E_z = 0$) であるが、 H_z は存在する電磁場モードのことを TE 波 (*Tranceverse Electric Wave*)、逆に磁界の進行方向成分はゼロ ($H_z = 0$) であるが、 E_z は存在する電磁場モードのことを TM 波 (*Tranceverse Magnetic Wave*) と呼び、前述の境界条件を満たして z 方向に進行することができる。

空洞共振器では導波管とは異なり、進行方向という概念は存在しない。そのため今回は 3 辺のうち $y < x < z$ となるように長さを設定し、 z を進行方向成分とみてモードの同定を行った。

また、その共振周波数（方形の場合）の決め方は以下の式で決まる。 a, b, l は各辺長、 m, n, p は各方向成分の腹の数を示した。方形空洞共振器の場合 TE, TM モードは一般に縮退している。

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2 + \left(\frac{p}{2l}\right)^2$$

1.2.2 空洞量子電磁力学実験

共振器内に単一原子を置き、内部の原子と電場の間の電気双極子結合を利用して、単一量子システムを制御する物理を C-QED(*cavity – QuantumElectroDynamics*) と呼ぶ。

今回は光子→マイクロ波（共振器内の 1 モード）、原子→人工原子（ジョセフソン素子）に置き換えて特性を調べる実験を行う。超伝導回路を用いた c-QED 実験はその性質から、circuit-QED と呼ばれる。

第 2 章

研究目的

前述の通り、IJJ 素子の特性を調べるため、40GHz 以上で共振周波数の調整が可能な空洞共振器の設計が目的である。

2.1 昨年度の研究結果

昨年度は、空洞共振器の大きさと誘電体を挿入した際の共振周波数を調べていた。[引用つける]

2.2 昨年度の課題

誘電体を挿入した際に共振周波数が下がることが観測されたが、以下の理由により実用的なモデルとは言えなかった。

2.2.1 共振周波数の調整方法

具体的にどのようにして共振周波数を調整するのが不明瞭。

誘電体を挿入することで共振周波数を変化させることができることはわかったが、昨年度使用していた誘電体の誘電率は 100 程度であり、マイクロメータを使用して共振周波数を調整したとしても、細く共振周波数を変化させられる仕様ではなかった。

2.2.2 外界との結合方法

空洞共振器は単体で共振現象を起こすものではなく、必ず外部からマイクロ波を入射する必要がある。外界と共振器の電磁場を結合させるために、同軸ケーブルを使用する。昨年度作成していたモデルでは、一辺の長さが 1mm 程度であり、同軸ケーブルを接続することができないモデルであった。

2.2.3 試料の設置位置が不明瞭

誘電体挿入時内部の電磁場がどのような分布になるのかが明らかになっていなかったため、試料の設置位置も不明瞭であった。

2.3 本研究の目的

昨年度の研究結果を受けて、改めて本年度の研究目的を整理すると、

- 誘電体による共振周波数の変化の傾向を明らかにする。
- 同軸ケーブルを接続したモデルを作成する。
- 誘電体挿入時の電場変化を考慮して試料設置位置を決める。

以上3点を満たした、共振周波数 40GHz 以上で調整可能な、実用的な空洞共振器の設計を行うことが本研究の目的である。