

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22684010

研究課題名(和文)低温フォトリックアシスト常伝導空洞による高電界・高Qを兼ね備えた新領域電子加速管

研究課題名(英文)Cryogenic photonic assisted cavity for the accelerating structure with high quality factor and high electric field

研究代表者

吉田 光宏 (Yoshida, Mitsuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：60391710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,900,000円、(間接経費) 5,670,000円

研究成果の概要(和文)：電子線形加速器で超伝導空洞と代替可能な高いQ値と常伝導の高電界を合わせ持つ、液体窒素温度で低損失な誘電体フォトリック構造を用いた加速空洞の実証が目的である。フォトリック構造は構造周期で決まる周波数帯のみにバンドギャップが存在し、電磁波を閉じ込める事ができる。また誘電体の誘電損失は低温で非常に小さくなる事が知られており、誘電体でフォトリック構造を作れば非常に高いQ値の加速空洞が構成できる。さらに電界強度についても誘電体には超伝導におけるクエンチのような原理的な限界が存在しない。これらを材料の誘電損失の評価から空洞の形成までを行うのが本研究の課題である。

研究成果の概要(英文)：The cryogenic dielectric photonic cavity can reach the new field of the accelerating structure beyond both of the superconducting cavity with high quality factor and the normal conducting cavity with the high electric field. The photonic band gap can store the RF field in the cavity and the dielectric material has very low loss tangent at low temperature. The ceramic material for such purpose was studied including its manufacturing process and the evaluation of the electrical properties. And the accelerating structure was demonstrated using the cryogenic and high power RF test stand.

研究分野：加速器

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器 フォトリック構造

1. 研究開始当初の背景

次世代の電子線形加速器は、円形加速器の限界を超える超高エネルギー物理実験のため高い電界強度が求められている。しかし常伝導と超伝導加速器の間では議論が分かれ、ILC計画としては超伝導加速器を採用したが、欧州原子核研究機構(CERN)の有力な次期計画のCLICは常伝導である。

このように常伝導と超伝導の間で議論が分かれる理由は、加速器パラメーターが対極的で、常伝導ではQ値が 10^4 程度であるが電界は60MV/mと高く、問題としてはQ値が低く高電界を得るには周波数が高くなり構造やビーム加速が難しくなる。また超伝導ではQ値が 10^{10} と非常に高いが、安定に得られる電界強度は30MV/m程度であり、問題として磁場によりクエンチが起き最大電界が低い。また原材料も高価であり、LHe冷凍機が必要である。このように、それぞれこれらの原理的限界や問題を抱えており、一長一短なためである。超伝導加速器ではQ値が高く、少ない高周波電力で高い電圧が得られ、また加速ビームを長時間加速できるのが利点だが、ビーム負荷のある加速器ではビーム負荷以上の超伝導本来の $Q = 10^{10}$ という極端に高いQ値は無意味であり、例えばILCの場合はビームの消費エネルギーと空洞蓄積エネルギーの比のビーム負荷 $Q = 4.5 \times 10^6$ であり、空洞もこの程度のQ値で良い。

従って、ビーム負荷のある電子線形加速器にとって、必要な加速空洞のQ値は $10^6 \sim 10^7$ 程度で、超伝導に固執する必要は無い事が分かる。しかし導体の空洞Q値は電気伝導率の平方根に比例する上に、表皮深さが浅くなると高周波による電子の散乱で異常表皮効果の影響が大きくなり、非常に高純度の無酸素銅を使用して低温での電気伝導度が非常に高くなっても、Q値は数倍にしかならず、常伝導ではこのような高いQ値は得られない。これを打破するような常伝導と超伝導の利点を併せもった中間的なフォトニックアシスト加速空洞を開発する事が本研究の主題である。

2. 研究の目的

超伝導加速器ではQ値が高く、少ない高周波電力で高い電圧が得られ、また加速ビームを長時間加速できるのが利点だが、ビーム負荷のある加速器ではビーム負荷以上の超伝導本来の $Q = 10^{10}$ という極端に高いQ値は無意味であり、例えばILCの場合はビームの消費エネルギーと空洞蓄積エネルギーの比のビーム負荷 $Q = 4.5 \times 10^6$ であり、空洞もこの程度のQ値で良い。

従って、ビーム負荷のある電子線形加速器にとって、必要な加速空洞のQ値は $10^6 \sim 10^7$ 程度で、超伝導に固執する必要は無い事が分かる。しかし導体の空洞Q値は電気伝導率の平方根に比例する上に表皮深さが浅くなると高周波による電子の散乱で異常表皮効果

の影響が大きく、高純度の無酸素銅を使用して低温での電気伝導度が非常に高くなっても、Q値は数倍にしかならず、常伝導ではこのような高いQ値は得られない。これを打破するような常伝導と超伝導の利点を併せもった中間的なフォトニックアシスト加速空洞(図1)を開発する事が本研究の主題である。

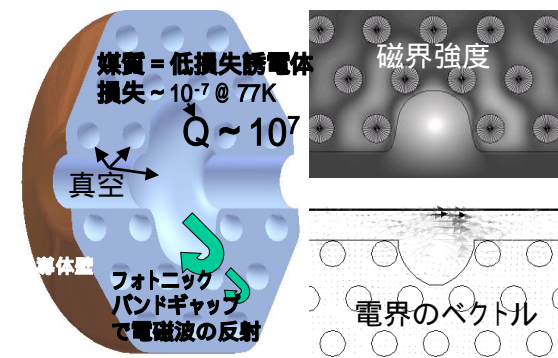


図1: フォトニック加速空洞の概念図とシミュレーション

低温フォトニックアシスト常伝導空洞の性能はフォトニック構造と、低温での誘電損失によって決まる。

フォトニック構造

構造周期で決まる周波数帯のみに禁止帯(バンドギャップ)が存在し、電磁波を閉じ込める事ができる。光波長領域では盛んに研究されている。

低温における誘電体の誘電損失($\tan \delta$)

低損失な物質でも常温で $\tan \delta$ は 10^{-4} で、 $Q = 1/\tan \delta$ から、常温では $Q = 10^4$ が最大である。しかし例えばサファイアは $\tan \delta$ が T^5 に比例する事が知られており、常温で $\tan \delta = 10^{-4}$ であるが、80[K]では 10^{-7} 、4[K]で 10^{-9} 台の実験値が得られている。

このように低温で低損失になる誘電体でフォトニック構造を作れば、液体窒素温度においてQ値が 10^7 程度の加速空洞が構成できる。しかしフォトニック構造は電磁波の染み出しがあり、1周期で1/10程度の電力の減衰である。フォトニック構造のみで電磁波を 10^7 のQ値で閉じ込めようとした場合、7層程度のフォトニック構造の層数が必要となってしまう。そこでフォトニック構造のみで電磁波を閉じ込める事に固執せずに、図2のようにフォトニック構造は3~4層のみとして周りを常伝導壁で囲う事により最小限の大きさの加速空洞を構成する(フォトニックアシスト型)。常伝導壁表面での電力はフォトニック構造により1/1000程度になっているため、壁損失は 10^{-8} 台と誘電損失以下にできる。さらにフォトニック結晶と常伝導壁には超伝導のクエンチなどの原理的限界が存在しないため、常伝導と同じ非常に高い加速電界での安定な動作が期待できる。

3. 研究の方法

誘電体フォトニック空洞の性能は主に材質が決定する。サファイアを使用すれば非常に高性能な空洞が得られる事は分かっているが、サファイアでは量産が不可能であり実用的でない。原子時計などの基準空洞用に低温の低損失材料としてサファイアが利用されているのは、He 温度で最高のQ値を得たい事や、誘電率が大きく空洞が小さくでき、線膨張係数が小さいなど誘電損失以外の性質にもよる。液体窒素温度で 10^{-7} 程度の誘電損失を得るには高純度アルミナや、他の物質でも十分な低損失になる物質は存在する。従って、いくつかの候補物質について誘電体の全反射を用いたギャラリモード空洞で純粋な誘電損失の比較測定を行い、安価に量産できる誘電体材料を決定する。基本的には、アンモニウムドーソナイト ($\text{NH}_4\text{Al}(\text{OH})_2\text{CO}_3$) を熱分解して得られるアルミナは 99.99% と高純度で、そのまま焼結可能であるため、必要十分な低損失が得られる事が想定されていた。

これらの材料の評価を行うため、図2のような冷却試験用チェンバーを製作した。



図2：冷却試験用チェンバー

この冷却チェンバーの内部に、誘電体共振器と結合度を変えられる機構を導入し、誘電体の誘電損失を測定した。

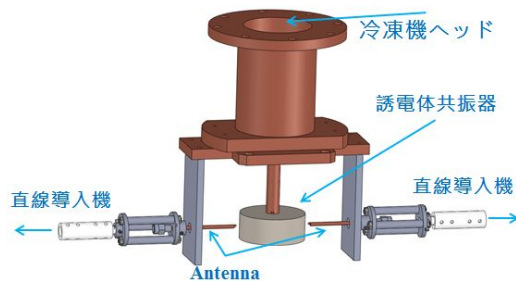


図3：誘電体共振器のQ値測定機構

誘電体の誘電損失は低温では非常に小さくこれを測定するには導体で囲まれた空洞では不可能である。従って誘電体の全反射を用いて誘電体内に電磁波を閉じ込める事のできる図4の誘電体共振器に蓄積される、図5の高次のギャラリモードを使用した。

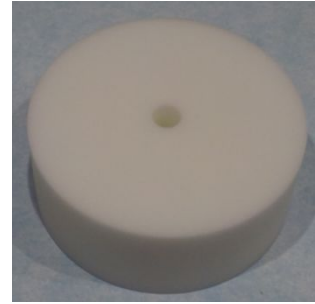


図4：誘電体共振器

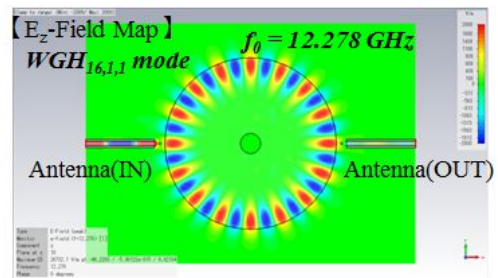


図5：ギャラリモード

これにより材料やセラミックの焼結方法の改良を行い、誘電体を選定する。

この誘電体の選定と合わせて、少ない層数で電磁波と閉じ込められるフォトニック構造を電磁波計算によって決定する。

これらにより加速空洞を製作し、Cバンドの数 100kW のクライストロンを用いて高電力試験を行う。

4. 研究成果

研究方法の通り、誘電体共振器を様々な誘電体材料で製作し、Q値の測定を行ってきた。特に超高純度のアルミナセラミックとして、アンモニウムドーソナイト ($\text{NH}_4\text{Al}(\text{OH})_2\text{CO}_3$) を熱分解して得られるアルミナの製造方法として様々な製造方法を試験した。

セラミックの製造にはセラミックの製造メーカーと連携しつつ、研究室でも製造工程を実際にも実現し、アルミナ粉末を分散剤を用いてポットミルで水と混ぜ、これを鋳込みにより製造する方法や、プレス成型する方法を行い、最終的にプレス成型でないと焼結密度が上がらない事が判明した。プレス成型後は、図6の電気炉によって 1600 程度で焼結し 98% 程度の充填率を得る事ができた。



図 6 : 1700 焼結用の電気炉

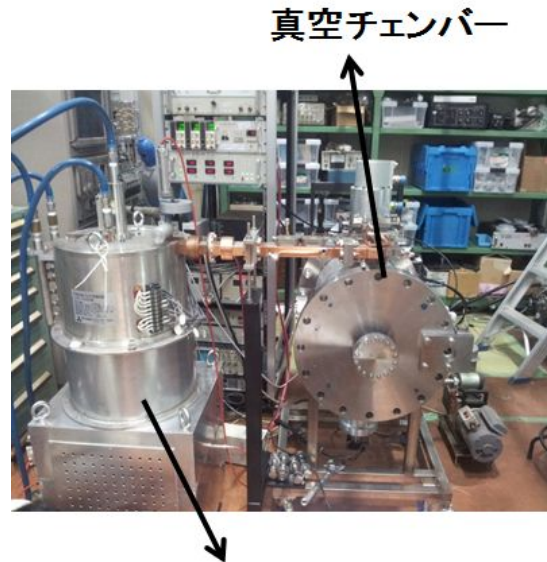
この方法で焼結したセラミックが図 7 である。この方法で得られたセラミックの Q 値はいくつかの製造メーカーの物より高い Q 値が得られた。



図 7 : 焼結したセラミック

最終的に様々なアルミナセラミックを評価し、最も Q 値の高くなるアルミナセラミックで本研究の目的の 100 万近い Q 値が得られた。また外装に用いる超高純度銅についても冷却試験を行い、40,000 程度の Q 値が得られている。従ってフォトニックと併せて 100 万程度の Q 値を得るには 2 層のフォトニック構造で得られるという計算結果が得られた。

これらの結果を用いて、加速空洞を製造し図 8 のように 100kW 程度の出力のクライストロンを冷却試験チェンバーに接続し、高電界試験を行っている。



クライストロン
C-BAND (5712MHz)
100kW

図 8 : 高電界試験装置

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 光宏 (YOSHIDA, Mitsuhiro)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究
施設・准教授
研究者番号： 60391710

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：