

Experiments on automodulation of an intense electron beam

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16530

氏名	鎌田正輝
生年月日	
本籍	愛知県
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第536号
学位授与の日付	2003年3月25日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	大強度電子ビームの自動変調実験
論文審査委員(主査)	鎌田啓一(研究科・助教授)
論文審査委員(副査)	安藤利得(理学部・助教授) 藤竹正晴(理学部・助教授) 出原敏孝(福井大学・教授) 升方勝己(富山大学・教授)

学位論文要旨

Abstract

Automodulation of an intense relativistic electron beam (IREB) passing through a series of passive coaxial cavities has been studied experimentally to obtain trains of subnanosecond electron bunches. Trains of subnanosecond electron bunches is an interesting subject of study for, for example, application to high-power, short pulse millimeter-wave generation called superradiance [1]. Automodulation was studied by M. Friedman, et al. [2]. They reported mainly 1 GHz automodulation using a series of four cavities. We report the single cavity experiment in detail. And a new approach to automodulation using decreasing length cavities for an IREB with slow rise time is proposed. A single cavity whose length was variable was utilized to observe how the relation between the rise time of the beam current and the cavity length affected the modulation level. The longer cavity resulted in the higher current modulation. The increases of electron energy for each cavity were compared to the gap voltage. The induced gap voltage was calculated by transmission line theory. The experimental and calculated results show good agreements. The gap voltage increases as the cavity length increased and saturates with a cavity length, as the round trip time for electromagnetic wave in the cavity is the same the rise time of the beam current. However, for high-frequency modulation, the round trip time of the cavity must be short. And the rise time of the beam current is difficult to decrease. In this case, a series of cavities with the same length was employed in ref. [2]. However, when the rise time of the beam current was much longer than the round trip time of the cavity, four-cavities with the same length could not increase the level of current modulation in our experiments. Here, we propose a series of decreasing lengths cavities to increase the level of modulation. The first cavity should be set to

the length appropriate to the rise time of the beam current to obtain high induced gap voltage. Length of following cavity was decreased to the length corresponded to the requested frequency. By using decreasing length cavities, level of current modulation with the requested frequency was increased.

大強度パルス電子ビームをビーム伝搬部に取り付けた同軸円筒空洞に入射すると、自動変調機構によってビーム電子は減速と加速を交互に受け、電子ビームはエネルギー変調される [2]。この自動変調現象を利用し、パルス幅の長い大強度電子ビームから、パルス幅がナノ秒以下の電子ビームが連なった、大強度短パルス電子ビーム列の生成が可能であるか実験的研究を行った。変調周波数に換算すると 500 MHz 以上が目標である。大強度電子ビーム源としては Physics International 社製の Model 105A Pulserad と Model 220G Pulserad を用いた。自動変調実験に用いた時の電子ビームのエネルギー、ビーム電流、パルス幅、パルス立ち上がり時間は、105A が、550 keV, 5 kA, 12 ns, 6 ns で、220G が、550 keV, 5 kA, 175 ns, 20 ns である。

まず、105A の電子ビームを用いて、自動変調機構の詳細な検証のために、単空洞による実験を行った。単空洞装置とファラデーカップによって測定されたビーム電流波形をそれぞれ図 1 と図 2 に示す。空洞長が長いほど、電流の変調度が上昇した。また、電子ビームのエネルギーをアルミニウム板を用いて測定したところ、空洞長が長いほど、最大エネルギーが上昇する結果を得た。伝送線路理論により、空洞のギャップ間に生じる加速電圧 $V_1(t)$ は次式で表されるように、空洞のインピーダンス Z_c と入射ビーム電流 I_0 の積で計算される。計算された加速電圧とエネルギー測定の結果は、良い一致を示した。

$$V_1(t) = Z_c [I_0(0, t) - 2I_0(0, t - t_0/2) + \dots] \quad (1)$$

実験結果から、立ち上がり時間が電磁波の空洞往復時間よりも長い場合、変調度は、空洞長が短いほど低くなってしまふことがわかった。そのような場合に対処する方法として、変調度が複空洞化によって変調度が上昇するか調べるために、同じ長さの空洞を連ねて実験を行った。その結果、空洞数が増えるにしたがって変調度が増し、米国の Friedman 氏らと同様の 75mm の 4 連空洞を用いて 1 GHz の変調ビームが生成できた。この時、電子ビームの最大エネルギーは 900 keV まで増加した。このように、105A のビームには複空洞化が非常に有効であった。しかし、一方の 220G のビームに対して、75mm の 4 連空洞では十分な変調がかけられないという結果が出ている [3]。この原因は、75 mm の空洞についての電磁波の往復時間 0.5 ns よりも、220G のビーム立ち上がり時間の方がはるかに長いために、複空洞でも変調をかけるには不十分であるからと考えた。ここで、我々は新たに空洞

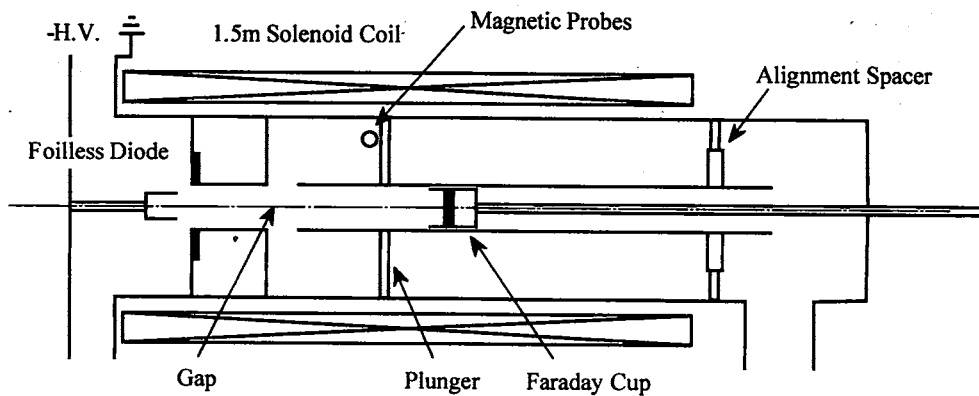


図1 単空洞装置略図。

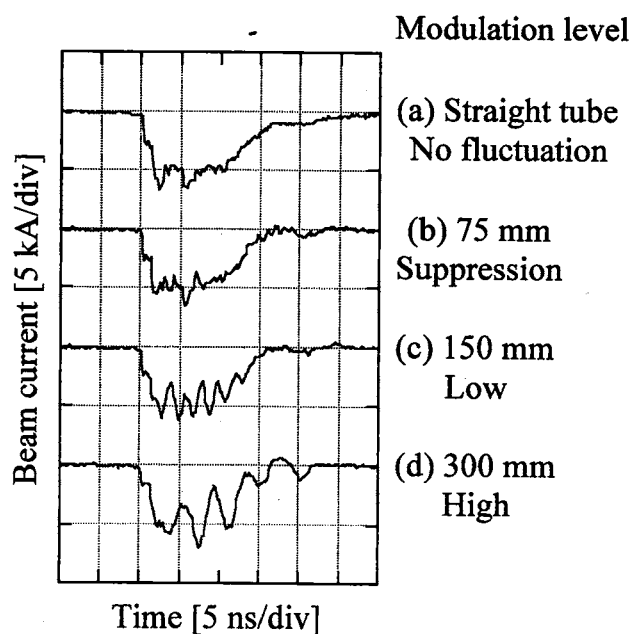


図2 単空洞自動変調後ビーム電流波形(105A)。

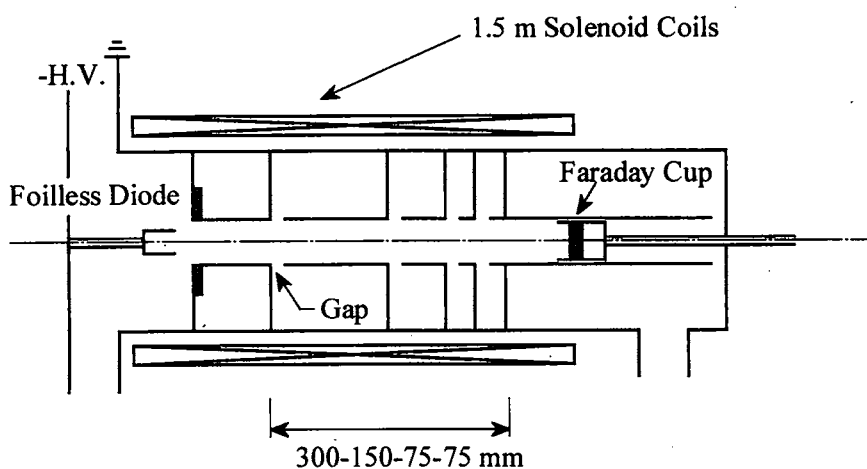


図3 多段空洞装置略図。

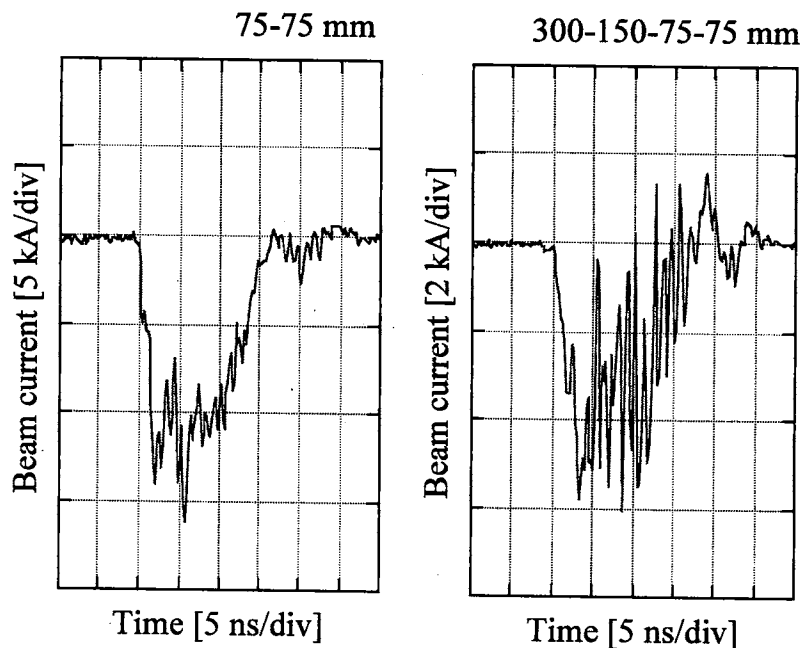


図4 多段自動変調後ビーム電流波形(105A)。

の多段化を提案する。空洞の多段化とは、初段の空洞長を変調に有効な長さにとり、下流に連なる空洞を目的の空洞長まで段毎に $1/2$ の等比で減少させていくことをいう。各段で立ち上がりが改善され、下流側に設置された目的の空洞で自動変調がおこることが期待される。目的の周波数の割合を高めるため、適宜最終段を複空洞にする。多段化の方法でナノ秒以下のビーム生成が可能であるか調べるために、空洞長を300-150-75-75 mmとした空洞装置に105Aのビームを入射して、多段自動変調実験をおこなった。多段空洞の略図を図3に、電流測定の結果を図4に示す。75-75 mmと300-150-75-75 mmの場合と比較すると、多段化の効果が明確である。多段自動変調によって、1 GHzの変調周波数をもつビームが生成できた。自動変調における電流変調の原因については、変調ビームの長距離伝搬実験とPICシミュレーションから、速度変調だけでなく密度変調がおきていることがわかった。最後に、220Gの電子ビームを用いて多段自動変調を行った。多段空洞の空洞長を900-450-225-225-225-225 mmに設定した。測定されたビーム電流波形を図5に示す。電流の最大値の50%近い振幅を得ることができた。これらの実験結果より、ビーム立ち上がり時間が波の空洞往復時間よりも長すぎて複空洞では不十分な場合でも、多段自動変調を適用すれば、高周波自動変調が原理的に可能であることが明らかになった。

今後、ソレノイドコイルを延長するなどの措置が必要であるが、空洞の多段化を進めて、下流にさらに短い空洞をつなげていくことで、220Gから1 GHzの変調ビームを得ることも可能である。実現すれば、0.5 nsの大電流

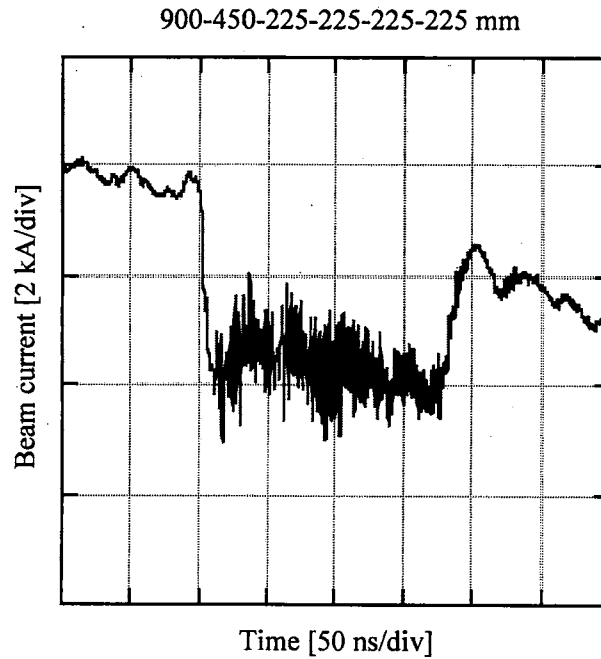


図5 多段自動変調後ビーム電流波形(220G)。

電子ビームが1 GHzの高繰り返しで発生できることになり、超放射などの高出力で短パルスの電磁波放射機構への応用性が広がる。さらには、定常状態の電子ビームの伝搬とは異なる、短パルス大強度電子ビームの伝搬に関する新しい物理領域を拓く可能性もある。本研究が、大強度電子ビームのハンドリングの研究や、新たな電磁波源研究等の大強度電子ビームの応用研究を行う研究者の助けとなれば幸いである。

References

- [1] N. S. Ginzburg et al., Phys. Rev. Lett., **78**, 2365 (1997).
- [2] M. Friedman et al., J. Appl. phys., **56**, 2459 (1984).
- [3] 宮本優, 平成九年度金沢大学大学院理学研究科修士論文

学位論文審査結果の要旨

本論文について、各審査委員による内容の検討と評言の交換の後、平成15年2月3日に公開口頭発表会を行った。その後、同日に審査委員会を開催し、本論文につき以下の結論を得た。

大強度電子ビームの強い自己場を利用し、伝搬路中に受動的な同軸空洞を設置することで、外部電源を用いずにビームに変調をかける方式を自動変調という。本論文では、自動変調の方式について、以下に示すように新たな知見を得、新方式を実証している。1) 一個の同軸空洞と大強度電子ビームの相互作用について詳細な実験を行い、空洞長とビーム電流立ち上がり時間、エネルギー変調の関係を明らかにした。2) これより、従来の同長空洞を複数連結し自動変調を行う方式の限界を明らかにした。更に、新たな方式として、ビーム電流立ち上がり時間を考慮し、空洞長を漸減させる多段自動変調方式を実証した。これは、従来のものに比べ、広いビームパラメーターに適用できる方式である。3) 複数空洞を用いる場合、隣り合う空洞は互いに電磁的に独立ではなく、ビームを介して、空洞間相互作用がおき、変調周波数が変化することを明らかにした。4) PICシミュレーションを用いて物理的機構の解明を行い、空洞入口での反射電子が電流変調に大きく寄与することを明らかにした。これらの結果は、大強度電子ビームの実験領域のみならず、新しい電磁波放射機構である超放射を初めとした応用範囲の拡大に大きく貢献するものである。このような内容から、委員会は本論文が博士論文に十分に値するものと判定する。