

氏名 茂 中 俊 明

学位（専攻分野） 博士（理学）

学 位 記 番 号 総研大甲第34号

学位授与の日付 平成4年 9月28日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻  
学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 X-band Free Electron Laser in the Ion Channel  
Guiding Regime

論文審査委員 主 査 教 授 高 田 耕 治  
教 授 平 松 成 範  
教 授 木 原 元 央  
教 授 遠 藤 有 馨  
教 授 北 村 英 男  
志 甫 諒（日本原子力研究所）  
鈴 木 康 夫（日本原子力研究所）



## 論文内容の要旨

A free electron laser(FEL) in the microwave region is considered as a device which can generate high peak power with high efficiency. The beam energy required for the FEL at microwave region is mildly relativistic (a few MeV), and to have enough gain the beam current should be high (a few kA). For such intense electron beam, the space charge effect is a very serious problem for stable transport and stable FEL interaction.

To reduce this space charge effect, the ion channel guiding was applied to the microwave FEL. Heavy neutral gas filled in the beam line is ionized by a KrF laser irradiation. The intense electron beam injected into the plasma channel ejects light plasma electrons and a column of the positively charged ion will remain. The opposite space charge of the ion channel can reduce the space charge effect of the intense electron beam.

Application of ion channel guiding for the free electron laser was not carried out upto now. Existence of the ion channel in the interaction region (in the wiggler) can degrade the FEL performance because of (1) non-linear focusing nature outside of the channel, (2) focusing by the electrostatic field may result in an energy spread, or (3) incoherent betatron motion may cause detrapping of the electron beam from the rf bucket.

On the other hand, the charge neutralization with the ion channel can suppress space charge effect and transport intense current to the interaction region with good quality avoiding emittance growth. If the ion channel guiding is used throughout the beam line, matching of the focusing will be easy.

We adopted the ion channel guiding method as a focusing scheme in the X-band free electron experiment at KEK. The purpose of this thesis is to study the performance of the X-band FEL with the ion channel gui-

ding , experimentally and theoretically. It may prove the effectiveness and the advantage of this focusing method especially for the microwave FELs those which use a relatively low energy and high current electron beam.

The 800 keV and 2.7kA electron beam with 80 ns duration is generated by an induction linac energized by two magnetic pulse compressors. The wiggler magnet has 15 periods with wiggler wavelength of 16 cm. A 9.4 GHz pulse magnetron is used as an input power source. For the ion channel guiding, diethylaniline (DEA) gas and a KrF laser was used. The KrF laser was fired from the downstream toward the induction linac, in advanced to the beam injection.

In the experiment, we observed 20-25 MW amplified signal at the wiggler magnetic field of 0.625 kG. The growth rate of the signal was measured as 18.06 dB/m at the resonance (at the wiggler field which gives maximum amplification). No saturation in the amplified power was observed.

These experimental results are compared with those obtained in theoretical analysis. One dimensional linear FEL theory (dispersion relation) was used for analysis. It gives good agreement with experimental results for reasonable parameters. To see the three dimensional effect such as the ion channel, we developed a realistic simulation code for the microwave FEL. Results of the simulation also agree with the experimental results or that of the dispersion relation for reasonable conditions. The simulation suggests that too high ion density degrades the FEL performance, because the space charge effect is not reduced due to the strong focusing. For our experimental condition, about  $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$  ion density, however, the degradation of the gain is small and rather, the ion channel can be considered effective to get a beam with good quality in the interaction region.

As a conclusion, we successfully amplified the 9.4 GHz signal to the

20-25 MW with spatial growth rate of 18.06 dB/m. These results were well explained by the dispersion relation and the newly developed simulation code. It is seen that the performance of the FEL is not affected by the ion channel with not too high density. The ion channel guiding can be considered as an effective method for the FEL in Raman regime, in which the effect of the space charge wave is important.

## 論文の審査結果の要旨

次世代の高エネルギー物理実験用加速器として電子陽電子リニアコライダーの研究がさかんに行われている。この種の加速器として電子勾配が50MV/mあるいはそれ以上で働く長さ20kmにおよぶりニアックが主要部分であるが、この高勾配をつくるために必要な大電力マイクロ波をどのようにして発生させるかが最大の問題である。その有力な方法のひとつとして、ウィグラー磁石を通過する相対論的大電流ビームによる自由電子レーザー（FEL）がある。

茂中俊明君の研究は、高エネルギー物理学研究所におけるFELのR&Dの一環として行われたものである。一般にこの目的で試作されるFELではエネルギー、電流がそれぞれでMeV、kA程度の電子ビームが使われるが、問題はリニアックに沿ってこの大電流ビームを発散させずに走らせながらFEL動作をさせることにある。同君の研究の主眼点は、これを解決するひとつの方法としてイオンチャンネルガイディングを世界で初めて試みたことである。予め短波長レーザー光によって電離されたガス中に大電流ビームを通すと、イオンがビームの空間電荷力WP中和するので発散を防ぐことができる。この研究では800KeV、800A、80ns長のパルス状ビームを約4m平行に走らせることに成功している。その内2.7mはウィグラー磁石であって、9.4GHzで20MW、50nsのマイクロ波を取り出した。

茂中俊明君はこの研究で、まずビームの拡がりについて詳細かつ精密な測定を行った。その一方で単電子の運動方程式にもとづくシミュレーションをおこない、ウィグラー磁石に到達するまでのイオンチャンネルガイディング部での実測との良好な一致を見ている。イオンが存在する場合におけるウィグラー磁石でのFEL動作の解析は大変複雑であるが、磁場の形および空間電荷力を正確に考慮したシミュレーションによって、イオンによる中和という通常のFELでは考えられなかった効果はFEL動作の妨げに殆どならないことを見だし、実測を裏付けている。

以上のように茂中俊明君の論文はイオンチャンネルガイディングを併用したFELという世界初の実験を報告するとともに、詳細なシミュレーションでその実験データの理論的究明をおこなった大変ユニークなものである。とくに

FEL動作に有望な結果を見いだしたことはリニアコライダー開発に寄与するところが大きい。従って、この研究は数物科学研究科加速器科学専攻の博士学位論文として相応しい内容を有していると判断した。

茂中俊明君について、同君の博士論文にかかわる専門分野ならびに基礎となる分野を口述により試験した。具体的には自由電子レーザー、円柱状大電流ビームのイオンによる中和、イオン中和力の自由電子レーザー動作に及ぼす影響等についてである。その過程において、実験装置全体の組立て、詳細な観測データ、数値シミュレーションによる解析が示された。同時に、基礎的な物理特に荷電粒子の運動を含む電磁気学についても質疑応答が行われた。以上すべてにおいて同君の仕事が十分に博士の学位に相応しいものであり、基礎及び専門分野での学識、理解が十分に深いと判断された。また、提出論文その他により、同君の英語の学力も十分であると考えられた。さらに、同君は、公開発表会による最終審査にも合格した。