

氏 名 DONG, Xiaowei

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 942 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Study on Mechanism of Electron Cloud Formation and  
Related Instabilities

論文審査委員	主 査 教授	細山 謙二
	教授	小磯 晴代
	教授	黒川 眞一
	教授	大見 和史
	助教授	福間 均（高エネルギー加速器研究機構）
	助教授	末次 祐介（高エネルギー加速器研究機構）
	特任教授	小方 厚（大阪大学）

In positron rings, electrons produced by photoemission and secondary emission accumulate in the vacuum chamber during multi-bunch operation with close spacing. A positron bunch passing through this “electron cloud” experiences a force similar to a medium-range wake field. This effective wake field can cause transverse coupled-bunch instability. In this thesis, I compute the electron-cloud formation and induced wake with various magnetic fields via computer simulation, for parameters representing the low-energy positron ring of KEKB and the ILC Dumping Ring in proposal.

Chapter 1 introduces history of the study to transverse instabilities due to electron-cloud. The problem of transverse instability and beam loss due to electron-proton interactions has long persisted. It was first observed at the Budker institute of Nuclear Physics (INP) Proton Storage Ring (PSR). Shortly thereafter, electron cloud- and beam-induced multipacting was found at CERN Intersecting Storage Rings (ISR) during the coasting beam operation, and was cured with clearing electrodes. More recently, an electron cloud caused transverse instability in a bunched proton beam in the Proton Storage ring at Los Alamos National Laboratory (LANL PSR). Similar instability, seemingly due to electron and proton interactions, occurred at the KEK Photo Factory (PF) and KEK B Factory. It was also reported in the Brookhaven National Laboratory Alternating Gradient Synchrotron booster, Stanford Linear Accelerator Center PEP-II, Beijing Electron Positron Collider, and the European Organization for Nuclear Research Proton Synchrotron (PS) and Super Proton Synchrotron (SPS). Gröbner suggested that beam-induced multipacting causes an electron cloud to accumulate inside the vacuum chamber. It then interacts with the proton or positron beam and hence destabilizes it. Single-bunch instability was first studied by K. Ohmi and F. Zimmermann applied to the KEK B Factory Low Energy Ring, where single-bunch instability is considered to be very serious. K. Ohmi also studied coupled-bunch instability when it was first observed at the KEK Photon Factory Storage Ring in 1995. In LER, solenoids are installed around the ring since September 2000 in order to remove the electron cloud which causes the enlargement of the beam size. The solenoids also work to suppress coupled-bunch instability due to the electron cloud.

Chapter 2 introduces simulation program. ECS is a 3-dimensional particle in cell simulation program developed to study the electron cloud instabilities. It is featured in Poisson equation solver based on Finite Element Method (FEM). The program includes a conformal triangular mesh generator, which is optimized for Poisson solver for big performance gain. Second-order generalized least -squares algorithm is proved to be a low-cost high-accuracy field interpolation method. Poisson solver is not only used to calculate space charge force by electron cloud, but also to calculate beam force along the boundaries as supplement to Bassetti-Erskine formula. Adaptive step size control for Runge-Kutta is carefully studied to get correct simulation result when strong magnetic field involves.

Chapter 3 introduces studies to electron cloud in magnetic field-free region, antechamber and drift space. Under the boundary conditions of antechamber, beam force can leak into slot part only a few millimeters. The motion of photoelectrons is dominated by their initial velocity and space charge force. In case of photoemission mainly occurs on illuminated region, potential of electron cloud itself can even stop electrons with small transverse initial velocity from drifting into beam chamber. This is the stopping effect of antechamber to electron cloud. Wake field and growth rate in drift space is calculated according to the model of electron cloud in KEKB low energy ring.

Chapter 4 introduces simulation study to electron cloud under solenoid field. A sinusoidal solenoid field is assumed in this thesis. Single photoelectron tracking shows the trajectory of photoelectron in solenoid field is the combination of gyration movement and cyclotron movement. This method also predicted a bottleneck-shaped electron cloud distribution. 3D PCI simulation program repeats such a result.

Wake field, growth rate and unstable mode spectrum are calculated.

Chapter 5 introduces electron cloud formation within quadrupole magnet and wiggler. Simulation shows electron's movement under strong magnetic field is tightly confined along magnetic flux. In both quadrupole magnet and wiggler, transverse diffusion of electrons on the X-Z plan is actually very weak. It implies that electron cloud generated with antechamber slot part is most likely blocked from diffusing into beam chamber. Therefore, the reflected photos could be the only cause of electron-cloud in beam chamber. Production rate of photoelectrons under such conditions should be a relatively small number. And uniform emission is also assumed. Calculation shows electron cloud density close to beam is always lower than threshold value in all 7 ILC damping ring model. No serious single-bunch instability can be predicted. Wake and its growth rate due to electron cloud in KEKB LER quadrupole magnets are also calculated.

## 論文の審査結果の要旨

Xiaowei Dong 氏の研究は、KEKB の陽電子蓄積リングにおける、電子雲によって引き起こされる結合バンチ不安定性に関するものである。具体的には、陽電子蓄積リングに各種の磁場（ソレノイド、2 極、4 極）が印加されている場合における電子雲によって引き起こされる結合バンチ不安定性を、精密な計算機シミュレーションを行って研究するものである。

ソレノイド磁場の場合は、これまでの研究においては、ほとんどの場合において、一様な磁場強度を仮定してきた。しかしながら、実際のソレノイド磁場は、最大 50 ガウス、最小 10 ガウス程度の範囲で変化している。実験によって求められた不安定性のモードを一様なソレノイド磁場を仮定したシミュレーションで説明しようとする、実際とは大きくかけはなれた 10 ガウス程度の磁場強度を仮定しなければならなくなる。この食い違いを説明すべく、Dong 氏は、な一様でないソレノイド磁場のもとでは、どのような電子雲が形成されるかについて研究を行った。

Dong 氏は、一様でないソレノイド磁場のもとでは、壁から発生した単一の電子をトラッキングすることにより、無視できない確率で、電子のミラートラッピングが起ることを発見した。ついで、Dong 氏は、有限要素法を用いた空間電荷効果を考慮にいたした 3 次元シミュレーション・コードを開発し、シミュレーションによってこの事象を再確認した。

Dong 氏のコードは、コードの適用可能性を慎重に検討したうえで作られており、このコードを適用することで、例えば、陽電子電流が大きくなったときには、アンテチェンバー内で発生した光電子がポテンシャル障壁を作り、ビームチャンバー内における電子雲濃度は減少することを発見している。

ミラートラッピングが起る場合は、電子雲は、ソレノイド磁場強度が強い部分に達する前に跳ね返され、比較的弱い磁場のところに閉じこめられることになる。Dong 氏は、さらに、ビーム・トラッキングを行うことにより、結合バンチ不安定性のモード解析を行った。上に述べたように、これまでのシミュレーションは、実際のソレノイド磁場の数分の 1 の強さの磁場強度を仮定しなければ、実験結果を再現できなかった。Dong 氏の研究は、この食い違いを説明するものであり、電子雲不安定性に関する研究において、新たな知見をもたらすものである。

Dong 氏は、さらに、4 極磁場が印可されたときの電子雲の分布を求め、どのような結合バンチ不安定性が引き起こされるかについて、ビームトラッキングにより調べ、4 極磁場中にトラップされた電子雲は結合バンチ不安定性を引き起こさないことをしました。

Dong 氏の仕事は、独創性に富み、また、電子雲不安定性研究に新たな知見をもたらすものであることから、本審査委員会は、全員一致で Dong 氏を合格とした。