オプティカルインジェクションを用いた単色エネルギー電子ビームの安定生成

小瀧 秀行

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 レーザー電子加速研究グループ (〒619-0215 京都府木津川市梅美台8-1-7)

Stable Generation of A Mono-Energetic Electron Beam by Using Optical Injection

Hideyuki KOTAKI

*Japan Atomic Energy Agency, Quantum Beam Science Directorate, Laser-Electron Acceleration Group,
8-1-7 Umemidai, Kizugawa, Kyoto 619-0215*

(Received July 8, 2012)

Laser wakefield acceleration, based on the effect of plasma waves excitation in the wake of an intense laser pulse, is now regarded as a basis for the next generation of charged particle accelerators. In order to generate a bunch with high quality and stability, required for applications, the electrons should be duly injected into the wakefield and this injection should be controllable. This paper reviews optical injection of electrons into the wakefield for a stable and a controllable electron beam generation. The wakefield is generated by a laser pulse. The second laser pulse collides with the first pulse at 180 and at 135 degrees realizing optical injection of an electron bunch. The electron bunch has high stability and high reproducibility compared with single pulse electron generation.

Key Words: Laser acceleration, Optical injection, Laser-plasma interaction, Intense laser pulse, High stability electron beam

1. はじめに

高強度レーザーとプラズマとの相互作用によりプラズマ波が生成される。生成したプラズマ波による電場(ウェーク場)によって電子を加速する「レーザー電子加速」¹⁾は、現在の汎用加速器である高周波加速器に比べて、超短パルスで低エミッタンス(指向性が高い)の電子ビームを短い加速距離でつくる事が可能となるため、高時間分解能の測定用光源や次世代の加速器のための電子ビーム入射器として期待され、各国で研究が進められている。レーザー電子加速研究により、エネルギー幅の狭い準単色エネルギー電子ビーム生成²⁻⁶⁾、数cmの加速での1 GeV電子ビーム生成⁷⁻⁹⁾等の成果が得られている。しかしながら、レーザー加速電子ビームの安定性に問題があるため、未だ実用化できていない。

電子ビームを、高周波加速器のように安定に加速するには、電子ビームを加速するための電場であるウェーク場を安定に生成する必要がある。ウェーク場生成用のレーザーの強度やプラズマ密度が高すぎると、ウェーク場が壊れてしまい、安定な加速ができなくなる。そこで、当初は、ウェーク場が壊れないようにレーザー強度及びプラズマ密度を調整しウェーク場を生成し、そこに加速用の電子ビームを外から入射してレーザー加速実験を行った¹⁰⁾。しかしながら、本研究には、加速電子ビ-

ーム生成用の電子ビーム入射器と電子加速のためのレーザープラズマが必要となる。電子入射器とレーザーの両方がある施設はほとんどないため、なかなか研究が進まず、電子入射及び電子加速ともにレーザープラズマを使用するようになった。レーザープラズマからの電子入射には、レーザーにより生成されるプラズマ波の破碎による入射が用いられた。

ここで、安定な電子加速に問題が起こった。電子の入射にはプラズマ波の破碎による自己入射が必要となるが、プラズマ波の破碎はウェーク場を乱し、電子加速が不安定となる。その結果、ショット毎に電子ビームの発生方向やエネルギー、電荷量などがふらついた。安定なプラズマ波をつくり、且つ、プラズマ波の破碎を起こすという矛盾する状況をつくらなければならないため、1レーザーパルスで生成したレーザー加速電子ビームを安定化させるのは、非常に難しい。レーザー加速生成電子ビームの安定化のため、プラズマ電子密度分布を利用する方法^{11,12)}や、プレパルスコントロールや磁場を用いる方法¹³⁻¹⁵⁾、価数の高いガスを用いる方法^{16,17)}などが研究されている。安定化の方法の1つとして、複数レーザーパルスを用いる方法がある¹⁸⁻²²⁾。この方法は、セットアップが複雑になる。しかしながら、以下のような優位点がある。複数のレーザーパルスを用いることにより、プラズマ波の励起を担うレーザーパルス(ドライバパル-

ス)と電子入射を担うレーザーパルス(インジェクションパルス)を分離できる。この分離により、安定なプラズマ波励起と電子入射を分けることが可能となる。これにより生成電子ビームの安定化及び電子ビームのコントロールを可能とした。これを「オプティカルインジェクション(光による入射)」という¹⁸⁻²²⁾。

プラズマ中の電子は、ほぼ光速で動くプラズマウェーク場に乗っていくことができない。ドライバパルスで生成したウェーク場に、2つのインジェクションパルスで電子を入射する方法がEsareyらによって提案された¹⁸⁻²⁰⁾。インジェクションパルス1と2をプラズマ中で衝突させ、そのときにできるビート波によりプラズマ中の電子をドライバパルスで生成したプラズマ波へ入射する。3パルスを用いる場合、電子入射位置をコントロールできるという利点があるが、セットアップが複雑になるため実験では成功していない。2レーザーパルスを用いる場合、ドライバパルスで安定なプラズマ波を作り、インジェクションパルスとドライバパルスとの衝突により電子の入射を行う^{21,22)}。この場合、ドライバパルスがプラズマ波励起と電子入射の両方を担うことになる。しかし、電子入射とプラズマ波励起の分離はできているため、電子ビームの安定化、エネルギーコントロールは可能である。2パルスでのオプティカルインジェクションは、フランス及び日本において実験でも証明されている²³⁻²⁵⁾。この2パルスでのオプティカルインジェクションについて紹介する。

2. オプティカルインジェクションによるレーザー電子加速の概念

まず、2レーザーパルスでのオプティカルインジェク

Fig. 1 A schematic of the optical injection by using two pulses. The driver pulse propagates to the right, and the injection pulse propagates to the left. (a) The driver pulse is a pump pulse to generate a plasma wake. (b) The colliding pulses produce a standing wave to inject plasma electrons into the plasma wake. (c) The injected electron bunch is accelerated by the wake wave.

ションについて説明する。Fig. 1に、2レーザーパルス衝突入射レーザー電子加速の概念図を示す。ドライバパルス及びインジェクションパルスは、それぞれ安定で自己入射のおこらないプラズマ波を励起する(Fig. 1 (a))。同一偏光の2つのレーザーパルスが衝突することにより定在波が生成され、その定在波によりプラズマ中の電子をプラズマ波へ入射する(Fig. 1 (b))。入射された電子は、プラズマ波により高エネルギーに加速される(Fig. 1 (c))。ドライバパルスの強度及びプラズマ電子密度を自己入射が起らない領域まで下げることにより、安定なプラズマ波を生成でき、その結果として、電子ビームの安定化ができる。2つのレーザーパルスの衝突位置のコントロールにより生成電子ビームのエネルギーのコントロールが、衝突する2つのレーザーパルスの偏光や強度のコントロールにより生成電子ビームの電荷量のコントロールが可能となる。このようにして、安定でコントロール可能な電子ビームを、レーザー電子加速により、生成できるようになる。

Fig. 2に、2次元粒子シミュレーションで得られたプラ

Fig. 2 2D (2 dimensional) PIC (Particle-in-Cell) simulation result of electron density distributions in plasma for $a_0 = 1.25$ and $a_1 = 0.5$. Here n_e is electron density, n_{cr} is critical density, and a_x is normalized electric field component. (a) No electron is injected in the wakefield. (b) The colliding pulses inject plasma electrons into the wakefield. (c) The injected electrons are accelerated by the wakefield.

ズマ中の電子密度分布と電子入射時のウェーク場の結果を示す。このときのドライバパルスの規格化強度、 $a_0 = 8.5 \times 10^{-10} \lambda_0 [\mu\text{m}] I_0^{1/2} [\text{W}/\text{cm}^2]$ は1.25、インジェクションパルスの規格化強度 a_1 は0.5である。ここで、 λ_0 はレーザーの波長、 I_0 はレーザーの集光強度である。Fig. 2 (a)は、2つのレーザーパルスの衝突前で、電子入射はまだない。Fig. 2 (b)は、衝突の瞬間であり、ここで電子バンチがウェーク場に入射される。入射された電子バンチは、Fig. 2 (c)のように、ウェーク場で加速される。電子入射は、2つのレーザーパルスが衝突したときのみ起こる。そのため、入射された電子バンチは数フェムト秒という短パルスとなり、周期が数十フェムト秒のウェーク場での加速でも、エネルギーが広がらず、単色エネルギーの電子ビームが生成できる。

また、ウェーク場による加速勾配は100 MeV/mm程度あり、数mmの加速で数100 MeVの電子ビームを得ることができる。電子ビームのエネルギーを上げるため、今後、加速距離の長尺化^{26,27)}や多段加速を行っていく必要がある。

3. 完全対向衝突による安定電子ビーム生成

実験は、超短パルス・高強度のチタンサファイアレーザーを用いて行われ、日本及びフランスで成功した^{23,24)}。ウェーク場生成用のドライバパルスは、軸外し放物面鏡(off-axis parabolic mirror: OAP)でガスジェットへ集光し、インジェクションパルスは、ドライバパルスとの衝突角180°で、OAPでガスジェット中に集光した。電子ビーム測定は、永久磁石・蛍光板・CCDカメラで構成された、電子スペクトロメータを用いて、電子ビームのエネルギー、エネルギー分散、角度広がり、電荷量を測定した。

まず、安定なプラズマ波を励起するため、自己入射(1パルス)でのレーザー電子加速実験を行い、自己入射が起こらないプラズマ電子密度を調べた。プラズマ電子密度を、自己入射での電子ビーム発生率が0%になるまで下げ、その状態で、オプティカルインジェクションによるレーザー電子加速実験を行った。Fig. 3に日本での実験結果を示す。本実験では、40 fs、0.4 Jのレーザーを用いて実験を行った。このときの集光強度は $I_0 = 3.0 \times$

Fig. 3 A typical image of an energy distribution of the electron bunch. The monoenergetic electron bunch has a peak energy of 134 MeV and an energy spread of 3.5% (rms).

$10^{18} \text{ W}/\text{cm}^2$ で、規格化強度 a_0 は1.2、プラズマ密度は $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である。図のように、インジェクションパルスを入射することにより安定な単色エネルギーの電子ビームが生成される。生成電子ビームのピークエネルギーは134 MeV、エネルギー分散は3.5% (rms)、電荷量は8.7 pC、発散角は4 mrad (rms)である。また、電荷量、エネルギー等の安定性も向上した。本実験により、オプティカルインジェクションでの高品質電子ビーム生成に成功した。

また、フランスでの実験では、2つのレーザーパルスのタイミング調整により衝突点を変化させ、電子ビームの加速距離をコントロールすることにより、生成電子ビームのエネルギーをコントロールし、50~200 MeVの電子ビームエネルギーのコントロールに成功した²³⁾。エネルギー分散は、10~20 MeV (FWHM)である。

4. 斜め衝突による電子ビーム生成

完全対向衝突によるオプティカルインジェクションの場合、衝突点のコントロールや安定化がしやすいが、戻り光によるレーザーシステムへのダメージが懸念される。さらに、高エネルギー電子ビームの進行方向に、インジェクションパルス用の光学系があり、電子ビーム利用の妨げとなる。そこで、70 fs、0.2 Jのレーザーを用いて、135°衝突でのオプティカルインジェクションによるレーザー加速実験を行った²⁴⁾。

完全対向衝突での実験時と同様、安定なプラズマ波を励起するため、まず自己入射(1パルス)でのレーザー電子加速実験を行い、自己入射が起こらないプラズマ電子密度を調べた。Fig. 4に、インジェクションパルスあり

Fig. 4 A typical image of an energy distribution of the electron bunch obtained by the counter-crossing injection at $n_e = 3.95 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, and a projection of the image onto the energy axis. The quasimonoenergetic electron bunch has peak energy of 15 MeV and energy spread of 7.8% (rms).

の場合の電子ビームのエネルギースペクトルを示す。このときの自己入射による電子ビームの発生率は0%である。図のように、インジェクションパルスの入射により単色エネルギーの電子ビームが生成される。生成電子ビームのピークエネルギーは15 MeV、エネルギー分散は7.8% (1.2 MeV) (rms)、電荷量は30 pCである。このエネルギーではエネルギー分散は現在使用されている高周波加速器より大きいものの、さらに加速すればエネルギー分散は小さくなる。計算及びシミュレーションより予想されているパルス幅は10 fs以下であり、瞬間の電流量は、高周波加速器よりも高い値を示している。またエミッタンスも、同等かより良い値を示している。斜め衝突での実験では、完全対向衝突の場合に比べて、レーザー出力が小さかったため、電子ビームエネルギーは、完全対向衝突実験時ほどのびなかった。しかし、電子ビームのエネルギーは、2レーザーパルス衝突後の、ドライバパルスにより生成されるウェーク場での加速で決まってくるため、同一のレーザーを用いれば、同じエネルギーが得られる。

次に生成電子ビームのパラメータのふらつきを比較した(Fig. 5)。自己入射の起こるパラメータでオプティカルインジェクションを行った場合、プラズマ波の破碎による乱れたウェーク場に、オプティカルインジェクションによる電子入射が起こるため、両者を比較しての安定化の議論はできない。また、ウェーク場の乱れないパラメータでは、自己入射が起こらないため、自己入射による電子ビームが生成できず、両者の比較はできない。そこで、オプティカルインジェクションでのプラズマ密度は、自己入射の起こらない $3.95 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、自己入射でのプラズマ密度は、自己入射による加速電子が最も安定であった $4.40 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ とした。これらを比較した結果、エネルギー・エネルギー分散・電荷量ともオプティカルインジェクションの方が安定であった。この結果より、斜め入射でのオプティカルインジェクションでも、生成電子ビームの安定化を示した。

完全対向入射及び斜め入射によるオプティカルインジェクションについて示した。どちらの方法にも、メリット・デメリットがある。さらに、衝突角度によっても、衝突点のコントロールのしやすさや、セットアップのつくりやすさ等に違いが生ずる。今後、それらについ

Fig. 5 The stability of the self-injection and the optical injection. The stability of the optical injection is higher than that of the self-injection.

ても、実験及び検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

レーザー電子加速は、小型・超短パルス・高品質の電子ビーム源として期待されている。しかしながら、ビーム特性の安定化及びコントロールが難しく、未だ、その利用研究に至っていない。本報告では、その安定化とコントロールするための方法として筆者が提案した「2パルスでのオプティカルインジェクションによるレーザー電子加速」の解説及び本手法による実験結果について紹介した。レーザー電子加速研究の進展により、ビーム特性の安定性の向上やコントロールが可能となってきたが、電荷量コントロールや単色性等、未だ既存の加速器の性能に及んでいない。今後、超短パルス・高品質のレーザー加速電子ビームを用いた応用研究が、現実のものとなり、超高速現象の測定や加速器の小型化等へつなげることを期待する。

参考文献

- 1) T. Tajima and J. M. Dawson: Phys. Rev. Lett. **43** (1979) 267.
- 2) E. Miura, K. Koyama, S. Kato, N. Saito, M. Adachi, T. Nakamura, and M. Tanimoto: Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 251501.
- 3) S. P. D. Mangles, C. D. Murphy, Z. Najmudin, A. G. R. Thomas, J. L. Collier, A. E. Dangor, E. J. Divall, P. S. Foster, J. G. Gallacher, C. J. Hooker, *et al.*: Nature **431** (2004) 535.
- 4) C. G. R. Geddes, Cs. Toth, J. van Tilborg, E. Esarey, C. B. Schroeder, D. Bruhwiler, C. Nieter, J. Cary, and W. P. Leemans: Nature **431** (2004) 538.
- 5) J. Faure, Y. Glinec, A. Pukhov, S. Kiselev, S. Gordienko, E. Lefebvre, J.-P. Rousseau, F. Burgy, and V. Malka: Nature **431** (2004) 541.
- 6) A. Yamazaki, H. Kotaki, I. Daito, M. Kando, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, S. Kondo, S. Kanazawa, T. Homma, K. Nakajima, *et al.*: Phys. Plasmas **12** (2005) 093101.
- 7) W. P. Leemans, B. Nagler, A. J. Gonsalves, Cs. Toth, K. Nakamura, C. G. R. Geddes, E. Esarey, C. B. Schroeder, and S. M. Hooker: Nature Phys. **2** (2006) 696.
- 8) K. Nakamura, B. Nagler, A. J. Gonsalves, Cs. Toth, K. Nakamura, C. G. R. Geddes, E. Esarey, C. B. Schroeder, and S. M. Hooker: Phys. Plasmas **14** (2007) 056708.
- 9) N. A. M. Hafz, T. M. Jeong, I. Choi, S. K. Lee, K. H. Pae, V. V. Kulagin, J. H. Sung, T. J. Yu, K.-H. Hong, T. Hosokai, *et al.*: Nature Photon. **2** (2008) 571.
- 10) M. Kando, H. Ahn, H. Dewa, H. Kotaki, T. Ueda, M. Uesaka, T. Watanabe, H. Nakanishi, A. Ogata, and K. Nakajima: Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) L967.
- 11) S. Bulanov, N. Naumova, F. Pegoraro, and J. Sakai: Phys. Rev. E **58** (1998) R5257.
- 12) C. G. R. Geddes, K. Nakamura, G. R. Plateau, Cs. Toth, E. Cormier-Michel, E. Esarey, C. B. Schroeder, J. R. Cary, and W. P. Leemans: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 215004.
- 13) T. Hosokai, K. Kinoshita, A. Zhidkov, K. Nakamura, T. Watanabe, T. Ueda, H. Kotaki, M. Kando, K. Nakajima, and M. Uesaka: Phys. Rev. E **67** (2003) 036407.
- 14) T. Hosokai, K. Kinoshita, A. Zhidkov, K. Nakamura, H. Kotaki, M. Kando, K. Nakajima, and M. Uesaka: Phys. Plasmas **11** (2004) L57.
- 15) T. Hosokai, K. Kinoshita, T. Ohkubo, A. Maekawa, M. Uesaka, A. Zhidkov, A. Yamazaki, H. Kotaki, M. Kando, K. Nakajima, *et al.*: Phys. Rev. E **73** (2006) 036407.
- 16) M. Mori, K. Kondo, Y. Mizuta, M. Kando, H. Kotaki, M. Nishiuchi, M. Kado, A. S. Pirozhkov, K. Ogura, H. Sugiyama, *et al.*: Phys. Rev. ST Accel. Beams **12** (2009) 082801.
- 17) M. Mori, M. Kando, H. Kotaki, Y. Hayashi, S. V. Bulanov, J. K.

- Koga, K. Kondo, A. S. Pirozhkov, H. Nishimura, and K. Nagashima: J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 105001.
- 18) E. Esarey, R. F. Hubbard, W. P. Leemans, A. Ting, and P. Sprangle: Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 2682.
- 19) C. B. Schroeder, P. B. Lee, and J. S. Wurtele: Phys. Rev. E **59** (1999) 6037.
- 20) E. Esarey, C. B. Schroeder, W. P. Leemans, and B. Hafizi: Phys. Plasmas **6** (1999) 2262.
- 21) H. Kotaki, S. Masuda, M. Kando, and J. K. Koga, and K. Nakajima: Phys. Plasmas **11** (2004) 3296.
- 22) G. Fubiani, E. Esarey, C. B. Schroeder, and W. P. Leemans: Phys. Rev. E **70** (2004) 016402.
- 23) J. Faure, C. Rechatin, A. Norlin, A. Lifschitz, Y. Glinec, and V. Malka: Nature **444** (2006) 737.
- 24) H. Kotaki, I. Daito, M. Kando, Y. Hayashi, K. Kawase, T. Kameshima, Y. Fukuda, T. Homma, J. Ma, L.-M. Chen, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 194803.
- 25) C. Rechatin, X. Davoine, A. Lifschitz, A. Ben Ismail, J. Lim, E. Lefebvre, J. Faure, and V. Malka: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 194804.
- 26) T. Hosokai, M. Kando, H. Dewa, H. Kotaki, S. Kondo, N. Hasegawa, K. Nakajima, and K. Horioka: Opt. Lett. **25** (2000) 10.
- 27) A. J. Gonsalves, T. P. Rowlands-Rees, B. H. P. Broks, J. J. A. M. van der Mullen, and S. M. Hooker: Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 025002.

レーザーワード

プラズマ波の破碎(wave breaking of plasma waves)

プラズマ中の電子振動により生成されるプラズマ波が、乱れ壊れること。プラズマ中に集光されたレーザーは、プラズマ中の電子を押しつけながら進む。その電子は、プラズマ中のイオンに引かれ振動し、プラズマ波を作る。船の後ろにできる波や、海岸に打ち寄せる波が、振幅が小さいうちはきれいな正弦波であるのに、振幅が大きくなったり、障害物があつたりすると、正弦波を保てなくなる。同様に、レーザー強度が高くなりプラズマ

波の振幅が大きくなったり、急激な密度勾配等の障害物があつたりすると、波が乱れ壊れる。これが、プラズマ波の破碎である。この破碎により、ウェーク場への電子入射が可能となる。しかし、ウェーク場はプラズマ波(電子の疎密)によって生成されるため、プラズマ波の乱れによりウェーク場も乱れ、電子加速が不安定になる。

(小瀧 秀行)