常伝導電子線型加速器の高繰り返し化に向けて

TOWARD HIGH-REPETITION NORMAL-CONDUCTING ELECTRON LINEAR ACCELERATOR

前坂比呂和[#, A)], 岩井瑛人[B), A)], 稲垣隆宏[A), B)], 田中均[A)]
Hirokazu Maesaka[#, A)], Eito Iwai[B), A)], Takahiro Inagaki[A), B)], Hitoshi Tanaka[B)]
[A)] RIKEN SPring-8 Center
[B)] Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

An X-ray free-electron laser is recently demanded to have a higher repetition rate to increase the statistical amount of experimental data. To fulfill this requirement, we propose a highly efficient normal-conducting electron linac, which can increase the repetition rate of SACLA from 60 Hz to 1 kHz without any additional RF energy. An electron beam is accelerated by a high-power short RF pulse of approximately 10 ns fed into a dielectric-loaded circular waveguide. Since the accelerating field is only excited where the electron beam travels, the energy efficiency can be improved 4 times compared to the present SACLA linac. In case that the RF frequency is doubled from C-band to X-band, the efficiency can be further increased 4 times. The total improvement is 16 times, which corresponds to the ratio of 1 kHz to 60 Hz. Thus, we found a possibility of a high repetition rate linac with the same RF energy consumption.

1. はじめに

X 線自由電子レーザー (XFEL) はその初レージングから 10 年以上が経過し、これまで幅広く利用されてきた。一方、XFEL は一般的にパルス運転の線型加速器で駆動されるため、実験データの統計量は加速器の繰り返し周波数と実験時間による制約を受けている。実際、XFEL 施設 SACLA は加速器の繰り返しが 60 Hz でさらにそのビームを 2 本のビームラインに交互に供給しているため、ビームラインあたり 30 Hz で利用されている [1]。近年の実験装置やデータ収集系はもっと速い繰り返しで動作するため、加速器の繰り返しがボトルネックとなっている。この状況を打開するため、CW 超伝導線型加速器を用いた 1 MHz 級の高繰り返し XFEL 施設の建設が米国の LCLS-II [2] と中国の SHINE [3] にて進められている。このようなことから、SACLA においても将来の高繰り返し化によるアップグレードを見据えて新しい線型加速器の開発を進める必要がある。

SACLA は、高加速勾配 (~35 MV/m) の C バンド加速器を電子ビームの主加速部に使用することにより他の XFEL 施設と比べてコンパクトな設計となっている。もし CW 超伝導線型加速器を採用する場合、大規模な冷凍機の新設が必要で、その消費電力は今の SACLA より大きくなる。また、CW 超伝導線型加速器の加速勾配は 15 MV/m 程度にとどまるため、SACLA の建屋に収まらない。しかも、1 MHz もの高繰り返しとなると実験装置やデータ収集がその繰り返しに対応できるとは限らない。このようなことから、繰り返し 1 kHz 程度でも十分なメリットがあるとの声も聞かれる。この場合、常伝導線型加速器にも可能性があると考えられ、工夫すれば現状の加速勾配や消費電力を維持することができるのではないか。そうすれば SACLA の建屋や設備の資源を引き継ぐことができ、無駄のないアップグレードができると思われる。そこで、常伝導線型加速器のエネルギー効率を大きく向上させて繰り返し 1 kHz が実現可能なものを考えることとした。

常伝導線型加速器の中で高効率・高加速勾配が得られるものとして、すでにいくつかの研究開発例がある。まずはテラヘルツ加速で、その波長の短さからエネルギー密度が高いため比較的低いパワーで高加速勾配を得ることができる [4]。しかしながら、大電力テラヘルツの生成やその位相制御が困難で、安定に運転することはかなり難しいと考えられる。次に挙げられるのは高い Q 値を持つ誘電体装荷型定在波加速管を使う方法である [5]。低電力試験では設計通りの性能が得られているが、高加速勾配での放電の問題や高繰り返しで運転での冷却などの課題も多い。

以上のようなことから、別の新しいアプローチとして、進行波加速管の高効率化で要求された性能を満たす方法がないか考えることとした。本稿では進行波管にて高繰り返しを実現するためのアイデアとその検討結果について報告する。

2. 常伝導進行波型線型加速器の高効率化

2.1 高効率化の概要

通常のディスクロード型進行波加速管の場合、RF の群速度は光速の数%で、2 m 程度の加速管に加速電場を立てるのに数 100 ns かかる。さらに加速勾配を上げるため、SLED 型の RF パルス圧縮器が使われることが多く、数 μs の大電力 RF パルスをクライストロンで生成する必要がある。この加速電場でシングルバンチを加速するだけの場合、ほとんどの RF エネルギーが使われずに熱に変わってしまう。

そこで、RF エネルギーを効率よく使う方法として、群速度の比較的速い加速管を短パルス RF で励振し、電子ビームが通過する部分だけに加速電場を立てる形の加速器にするのがいいのではないかと考えた。例えば単純な円筒導波管の TM01 モードで加速する場合、内部が

[#] maesaka@spring8.or.jp

真空だと位相速度が光速より速いため加速できないが、ある程度の誘電率がある場合は位相速度をほぼ光速、すなわち、電子ビームの速度に合わせることができる。実際、Fig. 1 に示すような円筒導波管に中空の誘電体を挿入した形にすると、中心部を真空にした上で位相速度を光速に合わせることができ、電子ビームを加速できる。このような加速管では群速度がそれほど遅くならない。そのため、短パルス RF で加速管を励振し、RF パルスの末尾と同時に電子ビームを入射して、電子ビームが加速されながら RF パルスの先頭に近づき、追いついた時点で加速管を出るようにすれば、最も効率よく RF エネルギーを利用できると考えられる。実際、加速管の長さが L のとき、群速度 v_g の加速管にて、電子ビームが RF パルスの先頭に追い付きながら加速されるとき、必要な RF パルス幅 T は次のようになる。

$$T = L\left(\frac{1}{v_g} - \frac{1}{c}\right) \tag{1}$$

例えば長さ 1 m, $v_g = 0.3c$ とすると RF パルス幅は 8 ns 程度でよい。このような短パルスであれば必要な RF エネルギーを低くできるのではないかと考えられる。

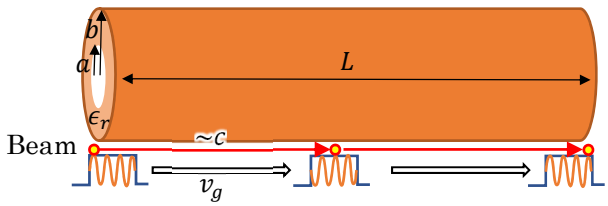

Figure 1: Schematic view of the short pulse RF acceleration scheme and the dimensions of the dielectric-loaded accelerator tube.

ただし、群速度が速いとインピーダンス[1]が下がるため高いピークパワーが必要となる。したがって、圧縮率の高いパルス圧縮器が必要である。そのようなパルス圧縮器としてあとで第 3 節に示すチャープパルス圧縮がある [6, 7]。この方式であれば数 10 倍の圧縮率が期待できるのでインピーダンスが下がっても現状の加速勾配を得るのに十分なピークパワーを生成できると考えられる。

また、短パルスであることから加速管内の放電率も抑制できるものと期待できる。というのは、加速勾配を E、パルス幅を τ とすると、経験式として放電率はおよそ $E^{30}\tau^5$ に比例することが知られているためである [8]。パルス幅が短いと放電率が大幅に下がるため、とくに定在波加速管に比べると短パルス RF 加速は放電に強くなると考えられる。

2.2 加速管のモデル

本稿では解析計算の可能な単純なモデルとして、Fig. 1 に示したような金属製の円筒導波管に中空の誘電体を入れた構造について考えることにする。誘電体の内半径を a、金属の内半径を b とする。また、誘電体の比誘電率を ϵ_r とし、比透磁率は 1 とする。

[1] これはシャントインピーダンスではないので注意されたい。シャントインピーダンスは損失パワーと加速勾配の 2 乗との比であるが、ここでのインピーダンスは入力パワーと加速勾配の 2 乗との比としている。

このモデルについてのマクスウェル方程式の境界値問題を円筒座標で解くことを考える。このとき、境界条件は $\rho = a$ で接線方向電磁場が連続であること、$\rho = b$ で接線方向電場が 0 となること、となる。この問題を変数分離して解くと固有値方程式が現れ、単極の TM モード、かつ、位相速度が光速のときは、

$$\frac{\epsilon_r}{pa}\frac{J_0'(pa)Y_0(pb) - Y_0'(pa)J_0(pb)}{J_0(pa)Y_0(pb) - Y_0(pa)J_0(pb)} + \frac{1}{2} = 0 \tag{2}$$

のようになる。ここに、$p = \sqrt{\epsilon_r\epsilon_0\mu_0\omega^2 - k^2}$、$\epsilon_0, \mu_0$ はそれぞれ真空の誘電率と透磁率、ω, k はそれぞれ RF の角周波数と管内波数で、J_l, Y_l はそれぞれ第 1 種、第 2 種ベッセル関数である。位相速度が光速でないときや他のモードの固有値方程式もあるが、ここでは省略する。これらの固有値方程式を解くと分散関係 (ω と k の関係) や a と b の関係を求めることができる。もちろん、固有値方程式以外にも電磁場の式も求められるし、固有値方程式を微分すれば群速度を ($v_g = d\omega/dk$)、電磁場の 2 乗を積分すればインピーダンスを得ることができる。

たとえば $\epsilon_r = 4$ (石英相当) とし、加速に使う TM01 モード以外のモードがなるべく伝送されないよう、なるべく小さい半径として $b = 16$ mm を選ぶと、$a = 8.3$ mm となる。このときの分散曲線をプロットすると Fig. 2 のようになる。TM01 モードは 5712 MHz にて位相速度が光速になっていることがわかる。この加速管で伝送できるモードは TM01 に加えて TE11 と TE21 となることもわかる。TM01 以外のモードも伝送されてしまうため、不要なモードを励起しないようにカプラを注意深く設計する必要がある。なお、このときの群速度は 7.9×10^7 m/s で光速の約 0.26 倍である。

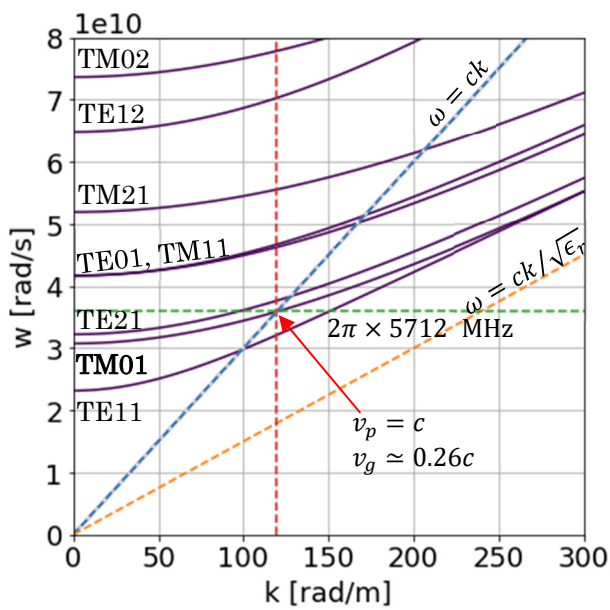

Figure 2: Dispersion relation of the dielectric-loaded accelerator tube. ($\epsilon_r = 4$, $a = 8.3$ mm, $b = 16$ mm)

つぎに電磁場分布を求めると Fig. 3 のようになる。この結果は 3 次元高周波電磁場シミュレーションソフトウェア ANSYS HFSS にて確認済みである。また、シミュレーションにて得られた電場分布を Fig. 4 に示す。

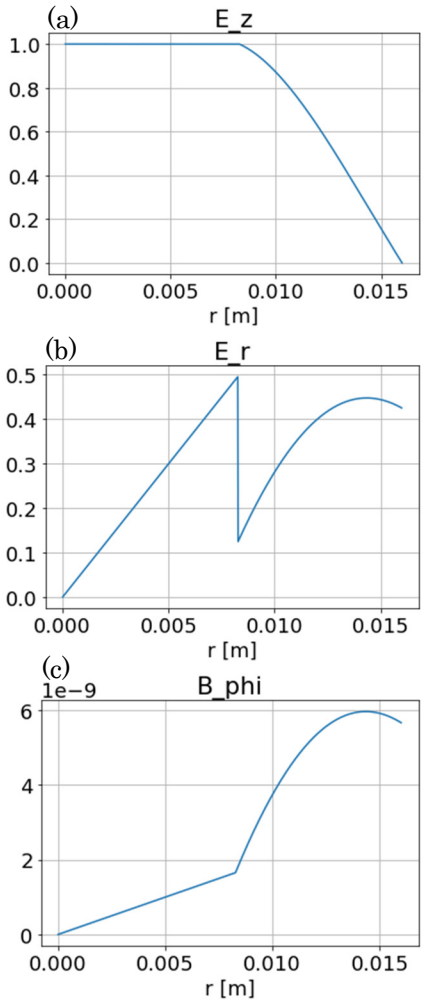

Figure 3: EM field distributions of the dielectric-loaded accelerator tube. The longitudinal and radial E-fields are plotted in (a) and (b), respectively, and the azimuthal B-field is plotted in (c).

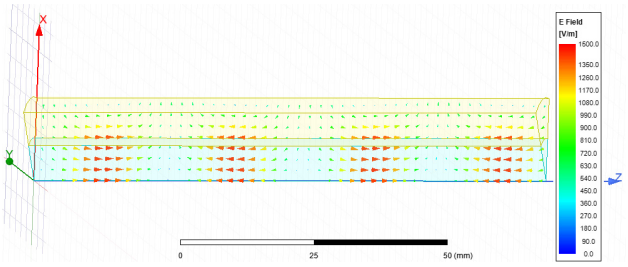

Figure 4: E-field distribution obtained from 3-dimensional rf simulation.

2.3 寸法の最適化

この加速管に必要なピーク RF パワーやパルス幅は加速勾配と加速管の寸法（半径 b や長さ L）に依存する。ある一定の加速勾配を得るのに必要な RF エネルギーが最小になるような寸法がわかれば最も効率的な運転ができることとなる。加速勾配 E_0 を得るのに必要なピーク RF パワー P は、インピーダンスを R とすると、

$$P = \frac{E_0^2}{R} \tag{3}$$

となるので、単位長さあたりに必要な RF パルスエネルギー PT/L は、次のようになる。

$$\frac{PT}{L} = \frac{E_0^2}{R}\left(\frac{1}{v_g} - \frac{1}{c}\right) \tag{4}$$

この PT/L を最小にすると最もエネルギー効率が良くなる。横軸を b にとって PT/L をプロットすると Fig. 5 のようになる。この結果から加速管の半径は極力小さくするのがよいことがわかる。今回の $\epsilon_r = 4$ の例では、$b = 16$ mm あたりがちょうどよく、加速勾配を 40 MV/m とすると $PT/L \simeq 7.5$ J となる。なお、現状の SACLA ではクライストロンからの 50 MW、2.5 μs のパルスを SLED で圧縮して 1.8 m 長の加速管 2 本を励振して 40 MV/m が出るという状況なので、$PT/L \simeq 34.7$ J という計算となる。単純計算で 4 倍以上の効率化ということになるが、ここに示した加速方法は途中の損失を無視している。しかしながら、多少の損失があったとしても 4 倍程度の効率化は見込めるだろう。

なお、この条件でのピーク RF パワーは約 800 MW で、パルス幅は加速管の長さが 1 m のとき 9.3 ns となる。これを得るにはクライストロンからの 50 MW、150 ns の出力を 16 倍圧縮すればよいという計算になる。

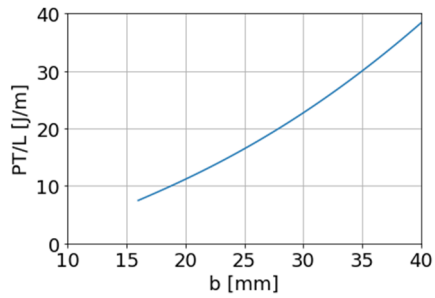

Figure 5: Plot of the rf energy efficiency, PT/L, as a function of the tube radius, b.

2.4 RF 周波数

前節にて現状の SACLA に比べて 4 倍の効率化ができそうなことが分かったが、RF エネルギーを維持したまま 60 Hz から 1 kHz に繰り返しを上げるにはさらに 4 倍程度の効率化が必要である。RF 周波数を上げると細い加速管にすることができてエネルギー密度が上がり、必要な RF エネルギーが低減できるのではないかと考えられる。そこで、周波数と RF パワーの関係について考える。

加速管内の RF パワーは電磁場の 2 乗を積分することで計算でき、真空部分 $\rho < a$ では、

$$S = \frac{\pi \epsilon_1 k \omega E_0^2 a^4}{16} \tag{5}$$

となる。誘電体部分 $a < \rho < b$ はベッセル関数の項が多く複雑なため省略するが、関数形は (5) と類似である。この中で係数 $k\omega$ は周波数の 2 乗に比例するのに対し、係数 a^4 は周波数の 4 乗に反比例する。これらを合わせると RF パワーは周波数の 2 乗に反比例することがわかる。したがって、4 倍の効率化をするには周波数を 2 倍、すなわち、C バンドから X バンドに変えればよいことがわ

かる。

3. RF のチャープパルス圧縮

第 2.1 節で触れたように、RF のチャープパルス圧縮は先行研究があり数 10 倍の圧縮率が実証されている。チャープパルス圧縮では、Fig. 6 に示すように周波数が時間的に変化するチャープ RF パルスを生成し、群速度が周波数に比例するような分散関係を持つパルス圧縮器に通すことによって短パルスでピークパワーの大きいものに変換する。たとえば文献 [7] によると、Fig. 7 に示すようなヘリカルコルゲート型の導波管はチャープパルス圧縮に適した分散関係を持っているとのことで、それを使って高倍率なパルス圧縮を行う。実際、このパルス圧縮器にパルス幅約 80 ns、周波数チャープ幅 約 500 MHz の波形を入力すると、パルス幅 1.5 ns (FWHM) の波形が出力されることが示されている。この例ではパワー比での圧縮率が約 25 倍、パルス幅率での圧縮率は約 50 倍となる。このように前節に示した 16 倍程度の圧縮率を達成できることはすでに実証されていることとなる。ただし、圧縮後の波形の立ち上がりを 1 ns のシャープなものにするにはチャープ幅が数 100 MHz の入力 RF パルスを生成する必要がある。あとはこのような大電力パルスクライストロンを実現できるかどうかが鍵となる。

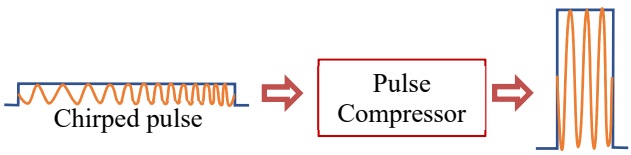

Figure 6: Schematic view of the principle of chirped rf pulse compression.

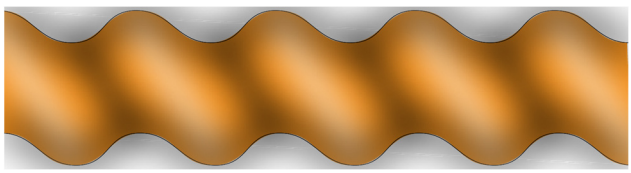

Figure 7: Helically corrugated waveguide for chirped rf pulse compression [7].

4. 今後の課題

これまで誘電体を装着した円筒導波管に短パルス RF を印加して効率よく加速することについて机上検討を行ってきた。ここではこの加速方式を実現するために必要な今後の検討課題について考える。

まずは RF 周波数についてである。現状の消費電力を維持したまま 1 kHz にするには周波数を X バンドにすればよいことがわかったが、SACLA で採用する場合、多くの C バンド資源の有効利用ができなくなってしまう。今回は単純なモデルでの検討のみ行ったが、形状を工夫するとさらに効率を上げる余地があるのではないかと思われる。このような形状の最適化を行い、C バンドで 1 kHz の繰り返しが達成できるようにすることが課題である。

次に、時間領域での RF パルスに対する応答の検討が挙げられる。今回の検討では周波数領域での計算を行っただけであり、実際に RF パルスを入力して計算したわけではない。短パルス RF が加速管に入ったときにどのような時間発展をするのか、また、パルス形状を維持するためには加速管の分散関係を調整する必要があるのかなど、詳細な検討が求められる。

さらには、実際に電子ビームを加速するには加速管本体以外にもさまざまなコンポーネントの設計が必要となる。加速管自体は加速に使う TM01 モード以外に TE11 モードと TE21 モードが伝送可能であるが、これらの不要モードが励起されると効率が下がったりビームへの悪影響が出たりする。加速管内に TM01 モードだけが励起されるよう、カプラ等の注意深い設計が必要である。また、チャープ RF パルスを生成するには広帯域クライストロンが必要なので、そのようなクライストロンの開発や、現状のクライストロンでどこまで短パルス化できるのかなどの検討も重要である。

本方式ではセラミックに高い電場がかかることになるので放電等に耐えられるかどうかの検討も必要である。パルス幅が短い分、放電には比較的強いものと期待しているが、本当に 40 MV/m で安定に運転できることを実証しなければならない。一方で過去に類似の先行研究として、誘電体を装着した加速管でのウェーク場加速に関するものがある [9]。これによると、周波数 10 GHz 程度、パルス幅数 ns で 100 MV/m 程度までは耐えられそうであり、THz 領域となると放電限界が 10 GV/m 程度となっているようである。本方式でも同様の試験を行う必要があるだろうと考える。

最後に、マルチバンチ加速の可能性についてである。SACLA では電子ビームを BL2 と BL3 に振り分けているが、できれば両方のビームラインに 1 kHz でビームを供給したい。短パルス RF 加速方式ではそのままだとシングルバンチしか加速できない。マルチバンチ加速する方法として、Fig. 8 に示すようなレゾナントリングを利用することが考えられる。レゾナントリングに短パルス RF を積み上げていき、リングの周回周期に同期して数バンチ加速するわけである。レゾナントリング自体には一定の損失があるが、複数バンチ加速することでバンチあたりの消費電力としては維持できるのではないかと考えられる。このようなマルチバンチ加速のアイデアについても検討する必要がある。

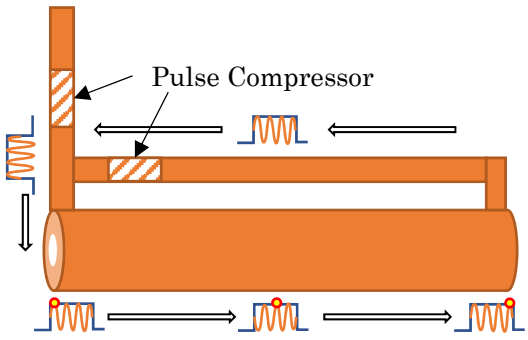

Figure 8: Schematic view of a resonant ring for multi-bunch acceleration.

5. まとめ

X 線自由電子レーザーでは線型加速器の高繰り返し化によるデータ品質の向上が課題となっている。そこで、常伝導線型加速器で消費電力を維持したまま 1 kHz の繰り返しを目指した新しい加速方式を考えた。この繰り返しを達成するには現状の SACLA が 60 Hz であることから 16 倍以上の効率化が必要となる。その可能性があるものとして、短パルス RF で進行波加速管を励振する方法を考案した。管径等の最適化の結果、単位長さあたりに必要な RF エネルギーは、同じ RF 周波数の場合 SACLA の約 1/4 にできそうであることがわかった。RF エネルギーの効率は周波数の 2 乗に比例することもわかったので、現状の C バンドから 2 倍の周波数である X バンドにすることによってさらに RF エネルギーを 1/4 にすることが可能である。合わせて 1/16 となり、1 kHz の繰り返しを達成する可能性を見出すことができた。この加速方式の検討はまだ机上での単純なモデルでの段階のため課題も多く残されている。今後、これらの課題を着実に解決していき、本方式による高繰り返し線型加速器を実現したい。

謝辞

本加速方式について、理研や JASRI の原徹さん、渡川和晃さん、渡部貴弘さん、高野史郎さん、早乙女光一さん、平岩聡彦さんからさまざまな助言をいただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

[1] T. Hara *et al*., “High peak current operation of x-ray free-electron laser multiple beam lines by suppressing coherent synchrotron radiation effects”, Phys. Rev. Accel. Beams **21**, 040701, (2018).
[2] LCLS-II Final Design Report, SLAC, Menlo Park, CA, USA, LCLSII-1.1-DR-0251-R0, Nov. 2015.
[3] Z. T. Zhao, D. Wang, Z. H. Yang, and L. Yin, “SCLF: An 8-GeV CW SCRF Linac-Based X-Ray FEL Facility in Shanghai”, Proceedings of 38th Int. Free Electron Laser Conf. (FEL'17), Santa Fe, NM, USA, Aug. 2017, paper MOP055, pp. 182–184 (2017).
[4] E. A. Nanni *et al*., “Terahertz-driven linear electron acceleration”, Nat. Comm. **6**, 8486 (2015).
[5] D. Satoh *et al*., “Fabrication and cold test of dielectric assist accelerating structure”, Phys. Rev. Accel. Beams **20**, 091302 (2017).
[6] S. V. Samsonov *et al*., “Compression of Frequency-Modulated Pulses using Helically Corrugated Waveguides and Its Potential for Generating Multigigawatt rf Radiation”, Phys. Rev. Lett. **92**, 118301 (2004).
[7] M. McStravic *et al*., “Experimental results on microwave pulse compression using helically corrugated waveguide”, J. Appl. Phys. **108**, 054908 (2010).
[8] A. Grudiev, S. Calatroni, and W. Wuensch, “New local field quantity describing the high gradient limit of accelerating structures”, Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 102001 (2009).
[9] M. C. Thompson *et al*., “Breakdown Limits on Gigavolt-per-Meter Electron-Beam-Driven Wakefields in Dielectric Structures”, Phys. Rev. Lett. **100**, 214801 (2008).