超短电子束团的产生研究

朱雄伟
中国科学院高能物理研究所

摘要

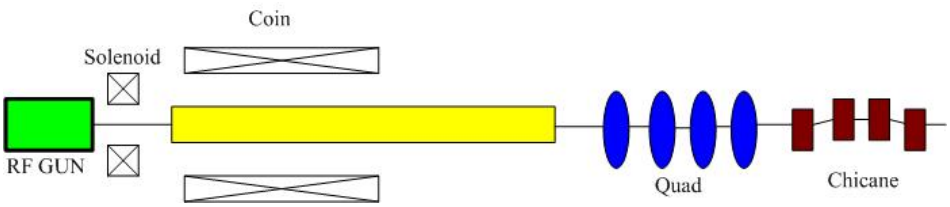
高亮度的超短电子束团的产生是目前电子直线加速器的一个研究方向。 常规加速器与基于等离子体的加速器都能产生超短（亚皮秒）束团。本文简要描述了一台产生超短电子束团加速器装置，并进行了模拟研究。

关键词：超短电子束团，束团压缩

1. 引言

随着激光等离子体加速器和自由电子激光装置的发展，超短电子束团的产生成为迫切需要。相对于常规直流热阴极电子枪， 光阴极电子枪是先进一代的电子源。目前各大实验室常用的 BNL 1.6 腔的驻波光阴极电子枪能产生约 10 皮秒的电子束团。由于在光阴极电子枪中存在严重的束团拉伸现象，很难直接在光阴极电子枪中产生亚皮秒束团。 通常我们需要采用束团压缩器来产生超短电子束团。

本文模拟研究了一台 S-band 超短电子束团的产生装置[1, 2]（见图一）。该装置由 BNL 型 S-band 光阴极电子枪、S-band 加速结构、螺旋管、聚焦线圈、束团压缩器所组成。



图一. 超短电子束团的产生装置示意图

2. 束团压缩的基本理论[3]

束团压缩技术广泛应用在自由电子激光装置与直线对撞机中，通过束团压缩获得高峰值电流的短束团。 压缩通常采用磁压缩技术，压缩由加速段与磁压缩器所构成，在加速段，加速相位不处于峰值加速相位，因而束团经过加速段时会产生依赖于束团位置的相干能散，而能量不同的粒子经过磁压缩器时会产生路程差，从而束团得到压缩。在线性理论中，位置、能散的依赖关系分别为

$$z = z_0 + R_{56}\delta$$

$$\delta = \delta_0 + az_0$$

chinaXiv:201701.00040v1

式中 R_{56} 为一阶动量压缩因子，δ 为相对能散，z, z_0 分别为压缩后与压缩前束团中粒子相对中心粒子的位置，a 为一阶能散位置相关因子(chirp)。假定无关的初始束团分布 $\langle z\delta \rangle = 0$，$\langle \cdots \rangle$ 为对束团的平均，压缩前后束团长度的关系为

$$\sigma_z \approx |1 + aR_{56}| \sigma_{z0}$$

上式中 aR_{56} 为小量，当 $aR_{56} < 0$ 时，$1 + aR_{56} < 1$，此时为压缩情形，这是束团压缩的基本原理。

3．加速器装置与数值模拟研究

装置由 BNL 型 S-band 光阴极电子枪、S-band 加速结构、束团压缩器所组成。光阴极电子枪的主要参数如下表，

表 1. 光阴极电子枪参数

阴极材料	Cu（Mg）
阴极半径	1.0 mm
量子效率	$> 10^{-5}$at 266 nm
阴极表面峰值场强	100 MV/m
枪出口电子束能量	~5 MeV
电子束电量	1 nC
枪出口能散	2% rms
微波频率	2856 MHz
电子束重复频率	10 Hz
微波脉冲长度	~ 3 μs
微波峰值功率（100 MV/m）	15 MW
电子枪单元数	1.6
电子枪长度	0.168 m
填充时间	0.55μs

加速结构由 61 个 cell 所组成，工作在 $2\pi/3$ 模式，加速管主要参数见下表，

表 2. S-band 行波加速管典型参数

工作频率	2856 MHz
工作模式	2π/3
场分布	Constant gradient
长度	2.09 m

腔数	61
品质因子	11000
分路阻抗	57 MΩ/m
衰减常数	0.57 dB
群速	0.02 – 0.03 c
填充时间	0.55μs

表3. 磁压缩器主要参数

参数	数值	单位
电子束团能量	15.46	MeV
电子束团能散（rms）	8.8	%
束团长度压缩比（rms）	10	
R_{56}	~13	mm
总长（1st 到 4th 二极磁铁）	1.04	m
1st 和 2nd(3rd 和 4th)两块二极磁铁之间的投影长度	0.194	m
2nd 和 3rd 两块二极磁铁之间的投影长度	0.19	m
二极磁铁有效长度	0.116	m
二极磁铁偏转角	10.6	°
CSR 发射度增长	40	%

压缩器前有四块四极铁用作加速管与磁压缩器之间的匹配。

我们用 PARMELA 模拟研究该装置。PARMELA[4]是一个多粒子 PIC 程序，它考虑了空间电荷效应，得到了业界的认可。所用版本的 PARMELA 程序没有考虑到相干同步辐射效应（ CSR ），所以其所得到的发射度增长效应较实际小。 模拟中我们考虑了边缘场效应。模拟中的激光参数为

表 4. 典型激光参数

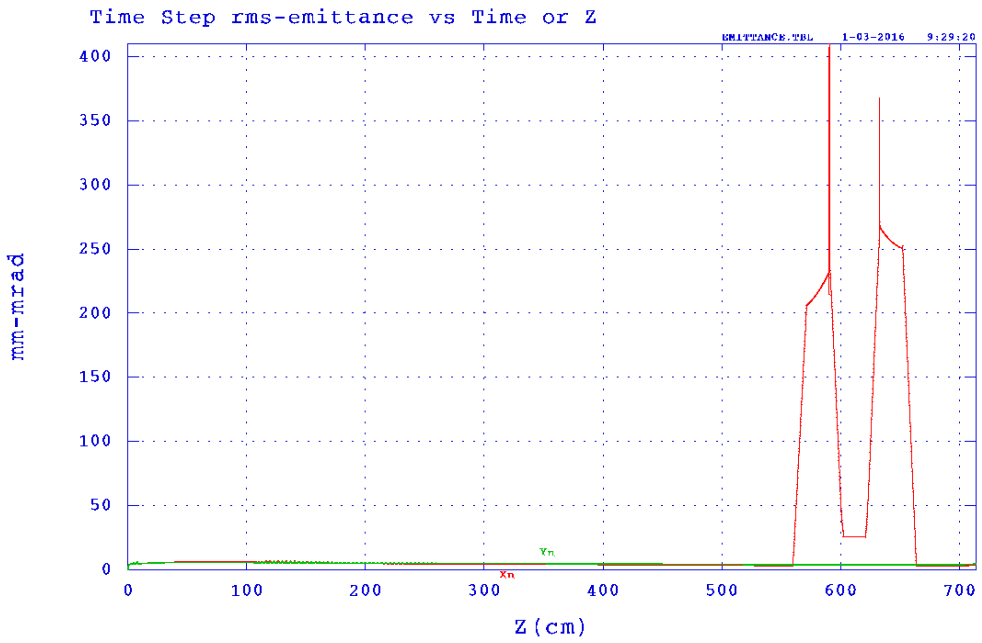
波长	266 nm
腰	1 mm
重复频率	10
脉冲能量	20 μJ
脉冲长度	10 ps
上升时间	0.7 ps
纵向形状	uniform

束团从 10 ps 压缩到小于 1 ps，压缩器中束团归一化发射度增长约为 0.1 mm mrad。

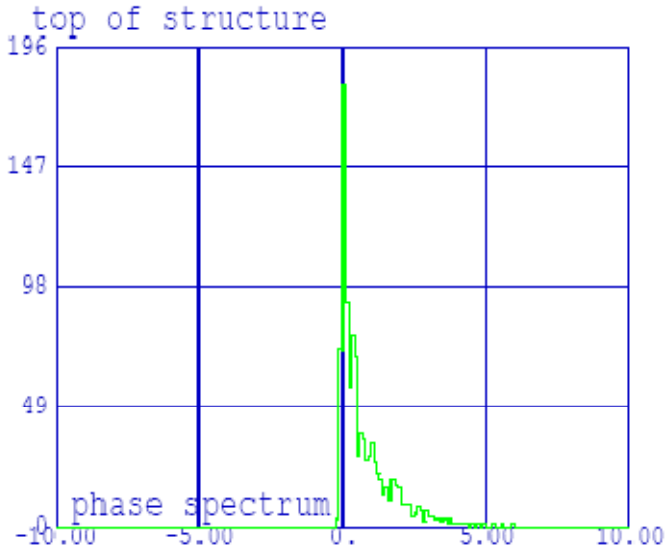
超短束团产生的加速器的主要参数如下表，归一化发射度演化图如图二。电子束团纵向分布见图三。

表 5. 加速器主要参数

能量	15 MeV
电量	1 nC
束团长度	< 1 ps
发射度	3.1 mm mrad
能散	7 %



图二、归一化发射度演化图



图三、超短电子束团的纵向分布

4. 讨论

本文模拟研究了一台 S-band 超短电子束团产生的加速器装置。 其所产生的束团可以用在外注入等离子体加速器的研究，也可以用作自由电子激光装置的电子源。

参考文献

1.Xiongwei Zhu, Simulation study of high intensity s-band photoinjector,International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004。

2.Xiongwei Zhu, Study on the production of the subpicosecond electron bunch, arXiv:1301.0703, 2013。

3. 朱雄伟，束团磁压缩的高阶限制，高能物理与核物理，2007。

4. L.Young, Parmela manual。