

# 加速器束流动力学期刊论文导读 (2024 年 2 月)

受“京师物理”公众号启发,我们几个同好便萌生将加速器领域的代表性期刊 Physical Review Accelerators and Beams (PRAB) 里的论文进行导读。主要 (但不限于) 导读材料选自 PRAB 近期上线的期刊,与部分美国物理学会 (American Physical Society, APS) 旗下的其它期刊或过去 PRST-AB、Elsevier 的核物理与技术 Nuclear Instruments and Methods (NIM) 期刊等可能涉及加速器方面的论文。与超快电子衍射成像动力学相关的论文则不在此限。

预期论文导读将于每个月初收集后发布,在 [http://faculty.hust.edu.cn/jcytsai/zh\\_CN/article/2191806/content/1551.htm#article](http://faculty.hust.edu.cn/jcytsai/zh_CN/article/2191806/content/1551.htm#article) 可以找到过去的导读文档。限于成员水平,导读仍许多地方有待改进 (正)。任何关于导读内容的指正、建议、意见都欢迎提出、交流,我们期待从交流讨论中激发的可能研究课题。

本期 (2024 年 2 月) 结果统计如下表

成员姓名	导读列表	联系方式
蔡承颖	[1]、[2]、[3]、[4]、[5]	jcytsai@hust.edu.cn
李嘉鹏	[??]	

## 目录

1	基于弯转磁铁参数自由电子激光振荡器可行性的实验探索 [NIMA 308] Experimental investigation of the operation of a parametric free-electron laser employing a bending magnet instead of an undulator	3
2	具有环形偶极响应的介电超材料 [PRX 5] Dielectric Metamaterials with Toroidal Dipolar Response	6
3	超材料简介 Introduction to Metamaterials	9
4	X 波段加速结构尾场引起的束流崩溃不稳定性研究 Study of wakefield-induced beam breakup instability on an X-band acceler- ating structure	13
5	超材料对矩形真空金属管道纵向阻抗影响的有限元仿真 FEM Simulations of Metamaterial Impact on the Longitudinal Beam-Coupling Impedance of a Rectangular Beam Pipe	15

## 1 基于弯转磁铁参数自由电子激光振荡器可行性的实验探索 [NIMA 308]

**Experimental investigation of the operation of a parametric free-electron laser employing a bending magnet instead of an undulator**

### 1.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：A.V. Serov (P.N. Lebedev Physical Institute)
- 类型：实验
- 链接：<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016890029190614V>

### 1.2 摘要

这篇论文从实验上探索基于弯转磁铁，而非波荡器，参数自由电子激光振荡器的可行性。呈现了产生毫米波段自由电子激光的实验结果。

### 1.3 贡献或创新点

- 创新点：一般自由电子激光的其中一个组成要件为波荡器 (undulator)，这篇论文将谐振腔里的波荡器换成一弯转磁铁，讨论利用弯转磁铁产生的相干同步辐射与适当设计谐振腔以产生自由电子激光的可行性。
- 贡献：这是一篇实验论文。实验架设如下图 Fig. 1，尝试通过一可局部移动的反射镜  $M_1$ ，使弯转磁铁  $BM_0$  的同步辐射在谐振腔里经历不同的往返长度，与后方产生的辐射场叠加。弯转磁铁  $BM_0$  也可以沿着谐振腔轴小幅移动，可以通过调整弯转磁铁，使电子束与谐振腔里的辐射场有些夹角，借以改变电子束与辐射场交互作用强度。

这里的电子能量约为 7 MeV，电流为 40 mA，产生的辐射场中心波长设定在 7 mm。当改变  $M_1$  位置时，即改变辐射场在谐振腔中的往返长度，则可产生辐射场强的干涉图样，如图 Fig. 2 所示。这里距离 Fig. 2 中相邻峰值间的距离较短，是因为在谐振腔里的辐射脉冲长度较短，因为辐射场由弯转磁铁产生。如果采传统波荡

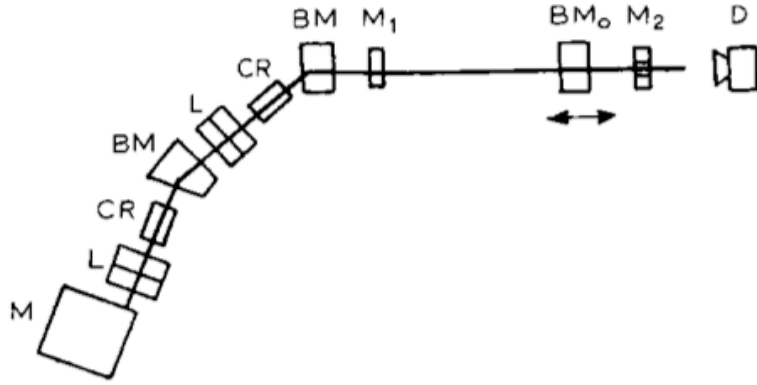


Fig. 1. The scheme of the experimental setup. M: microtron; L: lenses; CR: position correctors; BM and  $BM_0$ : bending magnets;  $M_1$  and  $M_2$ : mirrors; D: radiation detector.

器，则辐射场脉冲长度将有  $N\lambda$ ，其中， $N$  为波荡器周期数。还可以由 Fig. 2 推知电子束长，大约有 8-10 mm。

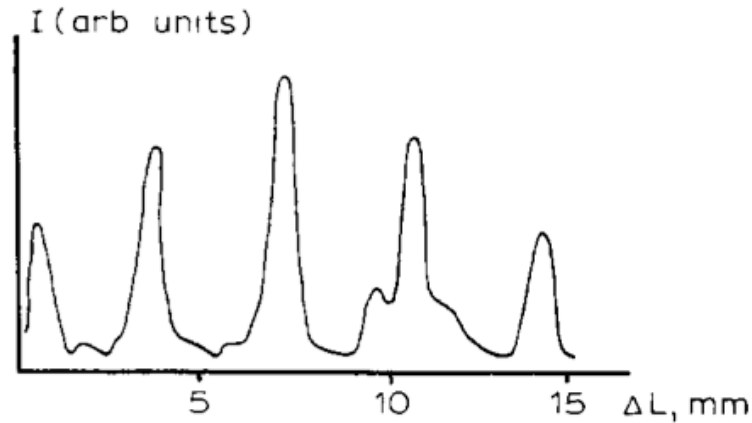


Fig. 2. The dependence of the radiation intensity on the position of the moving mirror of the resonator.

此外，通过调整电子束进入  $M_1$  的倾斜角度与  $BM_0$  之间的距离，可以调整电子束与辐射场的交互作用强度，或判断辐射场在谐振腔中的主要模式。参考下图 Fig. 3。电子束进入谐振腔没有倾角时，改变  $M_1$  与  $BM_0$  之间的距离原则上不影响辐射场强。

#### 1.4 其它

后续类似的工作还有，可参考：

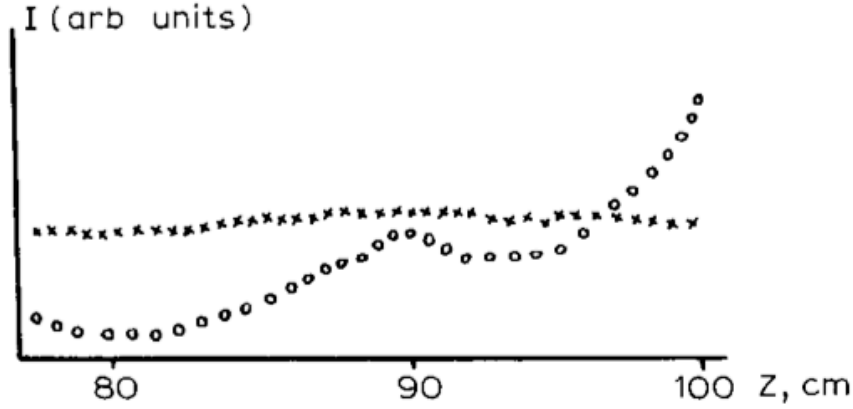


Fig. 3. The dependence of the radiation intensity on the distance between the mirror  $M_1$  and the bending magnet  $BM_0$ . The beam was injected at angles  $\alpha \approx 10^{-2}$  rad (○) and  $\alpha \approx 0$  rad (×) to the resonator axis.

- A.V. Serov, Experimental investigation of the operation of a parametric free-electron laser which utilizes transition and synchrotron radiations, NIMA 359, 70-72 (1995). [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01641-0](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01641-0)
- Y. Shibata et al., Prebunched free electron laser with a broadband spectrum, NIMA B 145, 49-53 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00229-8](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00229-8)
- S. Sasaki et al., A prebunched FEL based on coherent transition radiation in the far-infrared region, NIMA 483, 209-213 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00313-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00313-3)
- Y. Shibata et al., Coherent radiation from bunched electrons and prebunched FEL in the millimeter wavelength region, NIMA 483, 440-444 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00358-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00358-3)
- Y. Shibata et al., A prebunched FEL using coherent transition radiation in the millimeter wave region, NIMA 528, 162-166 (2004), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.04.038>

## 2 具有环形偶极响应的介电超材料 [PRX 5]

### Dielectric Metamaterials with Toroidal Dipolar Response

#### 2.1 基本信息

- 分类：其它
- 作者：Alexey A. Basharin, Maria Kafesaki, Eleftherios N. Economou, Costas M. Soukoulis, Vassili A. Fedotov, Vassili Savinov, and Nikolay I. Zheludev (主要机构：Foundation for Research and Technology Hellas, 希腊)
- 类型：理论、模拟
- 链接：<https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.5.011036>

#### 2.2 摘要

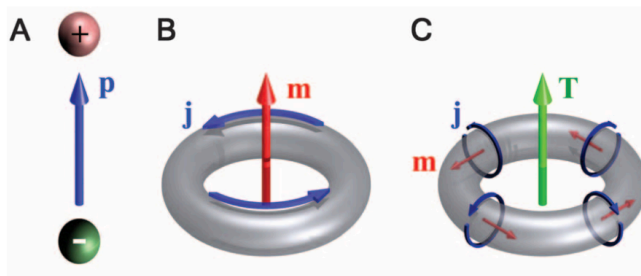
环形多极子 (toroidal multipoles) 是标准多极展开中缺失的项，由于它们与电磁场的相对弱耦合，通常被忽视。这篇论文提出并从理论上研究一种特殊类别的全介电超材料，它代表了在太赫兹频谱部分支持环形偶极激发的简单电磁系统。这篇论文展示这种超材料的共振传输和反射主要受到环形偶极散射的影响，而忽略这一点将导致对超材料宏观响应的误解解释。由于环形模式的独特场形，这篇论文提出的介电超材料可作为感测或增强光吸收和光学非线性的平台。

以下部分内容取自<https://www.zhihu.com/question/267627793/answer/3283775455>。

#### 2.3 贡献或创新点

- 创新点：2010 年在 Science 上一篇文章 [1] 指出，通过构造特殊的结构，实现环偶极子 (toroidal dipole)，即通过开口谐振环引入磁偶极矩，再将磁偶极矩构造成一个环形，就得到了环形偶极矩。该工作的缺点是开口谐振环是金属，具有一定的损耗，不能在更高频实现环偶极子。参考下图 Fig. 1，给出熟悉电偶极子 (A) 和磁偶极子 (B)。电偶极子 (或电荷偶极子) 是由正电荷和负电荷分离产生的，而磁偶极子是由电流的闭合循环产生的。环形偶极子 (toroidal dipole, C) 是一种特殊的基本电流激励，由 Zel'dovich 在 1957 年首先提出。

**Fig. 1.** (A) A pair of charges of opposite signs creates an electric (charge) dipole  $\mathbf{p}$ . (B) A current  $\mathbf{j}$  flowing along a loop produces a magnetic dipole  $\mathbf{m}$ . (C) Currents flowing on a surface of a torus along its meridians (poloidal currents) generate a toroidal dipole  $\mathbf{T}$ . The toroidal dipole can also be represented as a closed loop of magnetic dipoles arranged head-to-tail.



这篇论文创新点为提出利用全介质实现环形偶极子。所用的原理与上述类似，在单个介质中产生环形电流，通过特殊的排布，实现环形偶极子，参考下图 Fig. 1。

- 贡献：在每一个频率下，是由多种极子相互作用的，材料结构最终表现出什么样的性质，只能是某一种极子占主导。为了量化每一种极子，可以利用多偶极子展开的方法，研究每一种极子的特性与形态。细节此处不论。

这篇论文提出并从理论上研究了一类新型的全介电超材料，在太赫兹光谱部分表现出谐振环面偶极响应。该论文的超材料是基于高折射率介电圆柱体的亚波长簇，在谐振 Mie 散射下工作。该论文证明了圆柱的各个 Mie 模式之间的近场耦合能够抑制所有标准多极，并使由于环向偶极激励引起的电磁散射成为超材料响应的主要机制。这种超材料可以很容易地由低损耗的极化材料  $\text{LiTaO}_3$  制成，并且由于环形偶极模式的独特拓扑结构，可以用作传感或增强光吸收的平台。

## 参考文献

- [1] T. Kaelberer et al., Toroidal Dipolar Response in a Metamaterial, *Science* 330, 1510 (2010). <https://doi.org/10.1126/science.1197172>

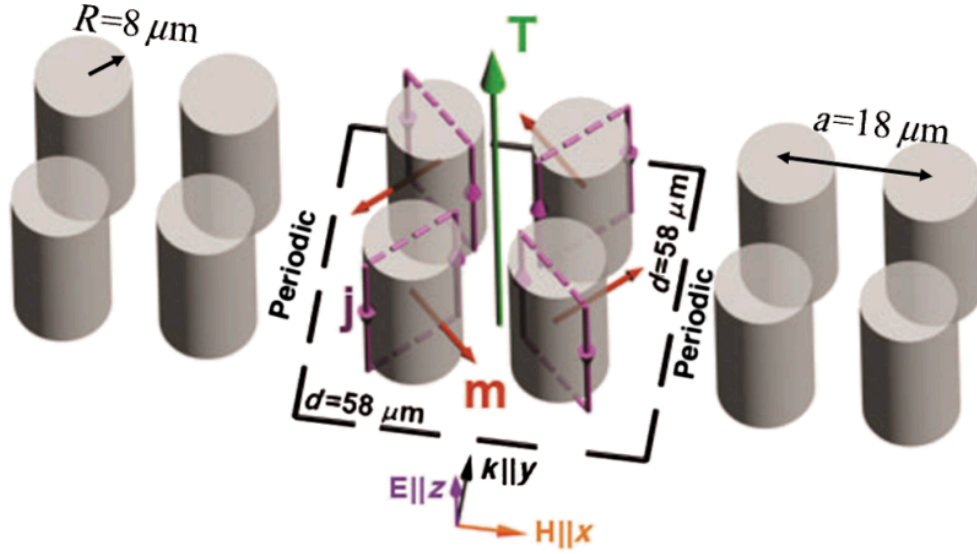


FIG. 1. A fragment of an all-dielectric metamaterial slab supporting toroidal dipolar excitation. Its metamolecule is composed of four closely spaced infinitely long high-index dielectric cylinders. The dashed box indicates the unit cell of the metamaterial, which is periodic along the  $x$  axis only. Purple arrows show displacement currents  $\mathbf{j}$  induced by the vertically polarized plane wave, red arrows show magnetic dipole moments of the constituent dielectric cylinders  $\mathbf{m}$ , and the green arrow represents the net toroidal dipole moment of the metamolecule  $\mathbf{T}$ .



### 3 超材料简介

#### Introduction to Metamaterials

##### 3.1 基本信息

- 分类：其它
- 作者：M.S. Wartak, K.L. Tsakmakidis, and O. Hess (主要机构：Wilfrid Laurier University, 加拿大)
- 类型：理论、模拟
- 链接：<https://www.ktsakmakidis.com/uploads/files/publications/3-17.pdf>

##### 3.2 摘要

这是一篇简短的关于电磁超材料的介绍，内容说明包含不少物理图像，不失为定性了解超材料的介绍文章。

##### 3.3 贡献或创新点

- 贡献：电磁超材料的英文为 metamaterial，为一种自然界不存在、人为构造出来的结构。最早在 1964 年，从电磁理论上探索这类材料的电磁特性的是俄国物理学家 V.G. Veselago。早期称“双负介质”(doubly negative material) (即  $\epsilon_r < 0, \mu_r < 0$ )、“左手材料”(left-handed material)，后来更多用超材料一词。直到 1996 年，英国物理学家 J.B. Pendry 首次尝试利用寻常材料，以周期性结构排列构造出超材料，包含使用周期排列的金属棒产生负介电系数、使用周期排列的分裂 (开口) 环形谐振腔 (split-ring resonator, SRR) 产生负磁导率等。

“超材料”一词或许有些误导；并不是用了新奇的材料，而是设计一种新的结构，电磁场在其结构表面附近或内部体现了有别于寻常结构的电磁行为，有些行为甚至称上奇异，因而称超材料。这些有别于寻常结构的电磁行为可以与其等效的本构参数，如：介电系数  $\epsilon$ 、磁导率  $\mu$  等互相关联。超材料的这些本构参数与设计的结构有关，甚至与构成超材料本身的寻常材料没什么关联。大多数文献上看到的超材料为周期性结构，但是周期性不是作为超材料的必要条件。

可以预见，与此相关的电磁波波段应该与结构尺寸有关，一般在毫米波、微波、太赫兹、远红外线波段。超材料构成单元的尺寸一般比感兴趣的电磁波波段小，为亚波长结构 (sub-wavelength structure)。超材料本身即是一个交叉学科领域，在许多领域已经得到或即将开展应用，如：将电磁超材料加载到天线，能改善天线的指向性。将电磁超材料涂覆在目标上，能确保目标在各种复杂环境下正常工作，使信息得到有效的传递，提高目标的隐身性能等。尽管广泛应用主要仍受限于损耗太大，近年来电磁超材料与加速器束流动力学相关的工作开始盛行。

由于在超材料中没有外部电荷与电流源，在材料中一般以  $\mathbf{E}, \mathbf{H}$  描述，法拉第定律与安培全电流定律可写成

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

其中，相对介电系数  $\epsilon_r$  与相对磁导率  $\mu_r$  可正可负。

为什么超材料又称左手介质，可由以下方式解释。将法拉第定律与安培全电流定律写成时谐形式， $\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow -i\omega$ ，有<sup>1</sup>

$$\begin{aligned}\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} &= i\omega \mu \tilde{\mathbf{H}} \\ \nabla \times \tilde{\mathbf{H}} &= -i\omega \epsilon \tilde{\mathbf{E}}\end{aligned}$$

再将时谐场做空间傅里叶变换， $\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) = \tilde{\mathcal{E}}(\mathbf{k})e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$ 、 $\tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) = \tilde{\mathcal{H}}(\mathbf{k})e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$ ，则  $\nabla \rightarrow i\mathbf{k}$ ，于是有

$$\begin{aligned}\mathbf{k} \times \tilde{\mathcal{E}} &= \omega \mu_0 \mu_r \tilde{\mathcal{H}} \\ \mathbf{k} \times \tilde{\mathcal{H}} &= -\omega \epsilon_0 \epsilon_r \tilde{\mathcal{E}}\end{aligned}$$

由上分析将发现，当  $\epsilon_r > 0, \mu_r > 0$  时，即寻常材料，电磁波的电场分量、磁场分量、传播方向满足右手定则，称右手材料。而当  $\epsilon_r < 0, \mu_r < 0$  时，即超材料，要描述电磁波的电场分量、磁场分量、传播方向，需采左手定则，称左手材料。

超材料的奇异性还体现在折射现象上。参考下图，可以看到，当  $n_2 > 0$  时，即寻常材料，折射电磁波满足寻常的 Snell 定律  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 。而当  $n_2 < 0$  时，即超材料  $\epsilon_r < 0, \mu_r < 0$ ，根据上面超材料折射率的定义，有  $n_2 = -\sqrt{\epsilon_r \mu_r} < 0$ ，折射角也将异号  $\theta_2 < 0$ ，即图中的射线 4。

---

<sup>1</sup>注意，该论文的负号写反，应为笔误。

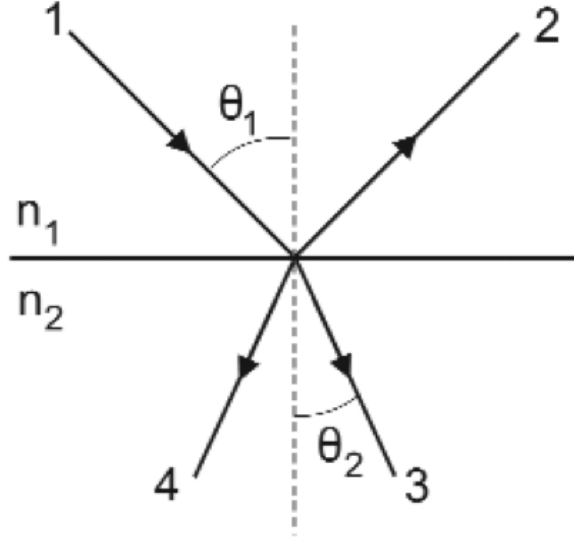


图 1: 电磁波在介质交界面的折射。射线 1 为入射线, 射线 2 为反射线, 射线 3 为当  $n_2 > 0$  为寻常材料时的折射线, 射线 4 为当  $n_2 < 0$  为超材料时的折射线。Snell 定律有  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 。按此示意图, 有  $|n_2| > n_1 > 0$ 。

接着, 这篇论文介绍如何构造超材料。典型的超材料有介电系数  $\epsilon < 0$  与磁导率  $\mu < 0$ 。以下分别讨论如何构造负介电系数与负磁导率的等效电磁结构。

目前来说, 人工构造一个结构, 考虑到工艺技术, 仍希望结构尺寸大约在  $\mu\text{m}$  以上, 或更典型的  $\text{mm}$  范围。因此, 电磁波频率被限制在较低频的微波、太赫兹区间。一个思路是: 改变等离子体频率, 特别是其中的等效等离子体密度  $n_{\text{eff}}$  与等效质量  $m_{\text{eff}}$ 。最早获得突破的是 J.B. Pendry 等人利用一周期排列的 (非铁磁) 金属棒, 当外部电磁波入射此周期结构时, 每根金属棒内的电子就随着电磁波振荡。但是, 电子只被局限在一维金属棒中, 不能随意移动。于是, 结构内等效的  $n_e$  就被构造出来了。目前来说, 超材料的等效  $n_{\text{eff}} \approx 10^{-7} n_e$ , 降了 7 个数量级。此外, 等效质量也可以估算, 细节此处不论, 增加了 4 个数量级。根据等离子体频率的定标关系

$$\omega_p \propto \sqrt{\frac{n_e}{m_e}}$$

于是, 本来在紫外频段的  $\omega_p$ , 现在降低了约 6 个数量级, 降到微波频段了。离构造超材料还有一半, 除了负介电系数, 还需要构造负磁导率。

构造负磁导率材料比负介电系数再复杂些, 因为现在没有类似介电系数与等离子体频率的关系能够直接利用。或者说, 除了陀螺性 (gyrotropic) 磁性材料外, 自然界没有负磁导率的材料。最早获得突破的仍是 J.B. Pendry 等人, 利用一周期排列、寻常 (非铁磁) 金属构成的分裂环谐振腔 (split-ring resonator), 当外部电磁波

入射此周期结构时，每个分裂环谐振腔面上的电子将随着电磁波振荡，但被局限在分裂环内，由于非封闭环路，没有形成回路的情况下，在端点附近就像电容器，在金属环上则像电感。在分裂环结构中，振荡的电荷、电流交替转换，分裂环谐振腔就像 RLC 电路，其谐振频率则由等效电容与等效电感决定， $\omega \sim 1/\sqrt{LC}$ 。此处略去定量分析，此分裂环谐振腔的磁导率可写为

$$\mu_r = \frac{B/\mu_0}{B/\mu_0 - M_d} = 1 - \frac{F}{1 - 1/(\omega^2 LC) + iR/(\omega L)}$$

其中， $M_d$  为邻近分裂环谐振腔面间引起的磁偶极矩， $F$  为单个分裂环谐振腔在单元体积内的占比。上式表明，只要分裂环谐振腔的尺寸设计 (即， $R, L, C$  等效参数) 与邻近间距安排恰到好处，将能够在特定频率区间产生等效负磁导率的设计。

留意，产生负介电系数与负磁导率的频率区间需要在同一频段内。整体而言，超材料由此为组成单元构成，按周期排列形成。

这篇论文最后介绍了一些目前超材料研究领域的热点问题，包含如何使光完全停止，克服损耗 (面向广泛应用前的必要条件)，抑制自发辐射的噪声等。细节此处不论。

## 4 X 波段加速结构尾场引起的束流崩溃不稳定性研究

### Study of wakefield-induced beam breakup instability on an X-band accelerating structure

#### 4.1 基本信息

- 分类：多粒子集体效应
- 作者：Jian Gao, Hao Zha, Jiaru Shi, Qiang Gao, Jiaqi Qiu, Chuanjing Wang, and Huaibi Chen (清华大学，北京)
- 类型：模拟、实验
- 链接：<https://doi.org/10.1109/TNS.2023.3322220>

#### 4.2 摘要

这篇论文从理论和实验两方面对清华大学开发的 X 波段直线加速结构中的束流崩溃动力学 (beam breakup, BBU) 进行了探讨。根据特征模态和模态通带 (mode pass-band) 的结果，我们发现在聚束段 (bunching section) 存在数个偶极模式。通过束流动力学计算，考虑尾场效应，证明了被束缚在聚束腔中的高阶模式 (higher-order modes, HOMs) 是束流不稳定的主要贡献因素。接着，这篇论文对 HOMs 进行了射频低功率测试和高功率实验，发现在射频冷测试中通带出现的不连续性。在高功率实验中，实现了 18.7 MV/m 的加速梯度，并测得动能为 6.1 MeV。提取并分析了 HOMs 信号，获得了 HOMs 的增长情况，并评估了主要的偶极模式。通过模拟和实验结果的验证，确认了加速结构中束流崩溃不稳定性是由被束缚在聚束腔中的 HOMs 和加速段的偶极模式的联合影响引起的。

以下部分内容取自<https://mp.weixin.qq.com/s/ApXsJxGuKU7JqcwEWgPhKA>。留意，微信公众号里的文字可能存在诸多错误。

#### 4.3 贡献或创新点

- 贡献：聚束段是尾场导致 BBU 不稳定的最薄弱环节。只有在更高的电流下，BBU 才会发生在加速段且独立于聚束段。虽然消除聚束段中偶极模式不会消除加速段中的 BBU，但会延迟 BBU 不可避免的不稳定性，从而达到更高的脉冲电流。为了抑制尾场效应，首先要对空腔进行优化，消除在聚束段的临界偶极模式，并产生

连续的 HOMs 通带。此外，加速腔的尾场可通过几何形状的调整来减小，如：在结构中采用较大的孔径。目前，已经开发出一种新的原型，并对聚束段进行了修改。

过去十年中，X 波段电子直线加速器因其紧凑的结构和高加速梯度而受到广泛关注。然而，当束团电流达到数百毫安时，尾场可能会使束流不稳定并导致束流崩溃。以往的研究已经发现束流崩溃现象，并将  $\text{HEM}_{11}$  混合模式视为束流不稳定性的原因。目前，人们已经进行了广泛的数值动力学模拟，研究中等加速梯度、直线对撞机和能量回收直线加速器中的束流崩溃不稳定性。此外，还对直线加速器进行了高阶模式分析和模拟。

这篇论文探索 X 波段加速结构中尾场导致的束流崩溃不稳定性。通过对束聚段中束缚模式和加速段的偶极模式进行分析和实验，希望揭示束流崩溃不稳定性的机制，并为 X 波段线性加速器的设计和优化提供参考。

X 波段直线加速结构由 8 个束聚腔和 15 个加速腔组成。搭建了一个高功率实验装置，包括调制器、速调管、直线加速结构、波导高通耦合器和其他测量设备。在高功率实验中，加速结构配备了一个热阴极直流电子枪，并以 2.5 MW 的输入射频功率运行。

实验结果总结如下：

- 通过矢量网络分析仪测量了  $S_{21}$  的幅度。
- 在  $S_{21}$  图中观察到离散的峰值，表明腔体中激发了各种高阶模式 (HOMs)。
- 这些 HOMs 的共振频率与模拟结果相匹配。
- 当天线放置在不同的位置时，没有检测到明显的模式信号。
- 在束聚段和加速段激发的 HOMs 无法相互传播。
- 射频击穿率 (BDR) 小于每脉冲  $10^{-4}$ 。
- 测得束流的最终能量为 6.1 MeV，脉冲电流为 200 mA。
- 平均加速梯度为 18.7 MV/m。
- 使用 T 型波导耦合器提取加速结构内部产生的尾场 HOMs。
- 检查了输出束流电流、尾场 HOMs 信号和电子枪发射电流的时间序列。
- HOMs 提取耦合器允许 12 GHz 以上的射频信号传输，同时阻断 11 GHz 以下的信号。
- 通过耦合器的 9.3 GHz 射频功率的传输损耗为 -0.42 dB。
- 在束流不稳定性存在的情况下，提取的同步 HOMs 信号在  $8\mu\text{s}$  后急剧增加。

## 5 超材料对矩形真空金属管道纵向阻抗影响的有限元仿真

### FEM Simulations of Metamaterial Impact on the Longitudinal Beam-Coupling Impedance of a Rectangular Beam Pipe

#### 5.1 基本信息

- 分类：尾场与阻抗计算
- 作者：A. Danisi, M. Grech, A. Masi, R. Losito, N. Sammut (主要机构：CERN)
- 类型：模拟
- 链接：<https://ieeexplore.ieee.org/document/7342504>

#### 5.2 摘要

在粒子束团穿过像 LHC 这样的加速器结构时，束团一部分能量会耗散到结构本身。这一现象可通过束耦合阻抗 (beam-coupling impedance) 来描述。理想情况下，应该减小耦合阻抗以提高束团质量和能量效率。这篇论文研究了使用具有负磁导率的超材料作为减小阻抗的方法。一种获得非各向同性负磁导率的快速且有效的方法是构建一组称为“分裂环谐振腔”(split-ring resonator, SRR) 的金属结构插入单元。在这项研究中，利用矩形波导加载 SRR，并通过数值模拟观察纵向束耦合阻抗。使用射频尾场激发模拟这一设置进行研究，并呈现和讨论模拟结果。此研究还可进一步研究在圆形波导中插入超材料单元以及其它方面更深入的可行性研究。

此为初步可行性计算，模拟结果表明，尽在很小频段内阻抗减小，并没有体现大范围有效的阻抗降低情况。

#### 5.3 贡献或创新点

- 创新点：这篇论文尝试将分裂环谐振腔 (SRR) 结构作为金属真空管壁的插入单元，研究存在 SRR 情况下，纵向耦合阻抗的改变。近年，超材料在加速器的应用逐渐展开，此为早期数值模拟工作的尝试。
- 贡献：这篇论文考虑矩形横截面的金属真空管，在其管壁加载如下图的平面分裂环谐振腔，其中，假设金属为理想导体。SRR 尺寸参考图中说明。

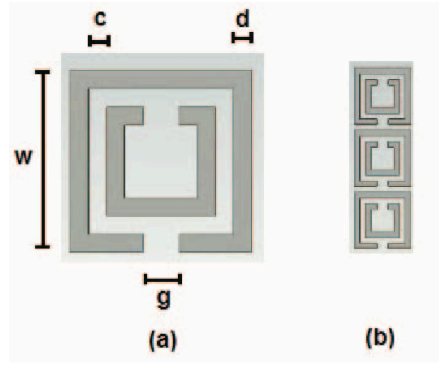


Fig. 1. (a) A Single Split Ring Resonator; width  $w = 5\text{mm}$ ,  $c = 1\text{mm}$ ,  $d = 1\text{mm}$  and gap size  $g = 2\text{mm}$   
(b) An Array of three SRRs

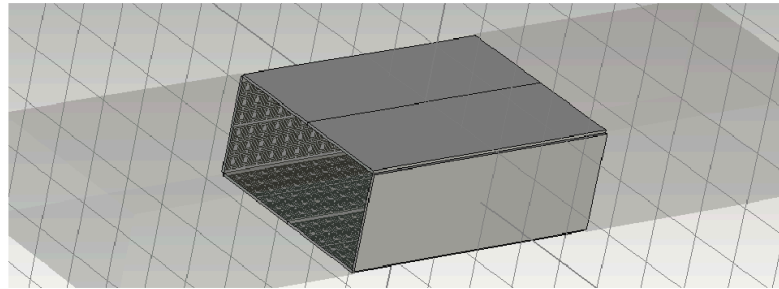


Fig.2 Metamaterial coated waveguide in CST Particle Studio

然后，利用 CST 数值模拟，计算 S 参数，如图 Fig. 3。在 4-4.5 GHz 出现透射系数减小，说明耦合阻抗可能在这个频段减小。根据 S 参数计算的结果，得到纵向耦合阻抗，如图 Fig. 4 给出。可以看到，在 4-4.5 GHz 间确实出现阻抗相对小值，但是相比于没有加载 SRR 的同尺寸矩形金属管道，似乎阻抗并没有改变太多。阻抗相对小值还出现在 0.5-1 GHz 附近。此外，加载 SRR 金属管道的阻抗计算结果的其它频段可能比未加载 SRR 的空金属管道阻抗大。

#### 5.4 其它

此为初步可行性计算，模拟结果表明，尽在很小频段内阻抗减小，并没有体现大范围有效的阻抗降低情况。



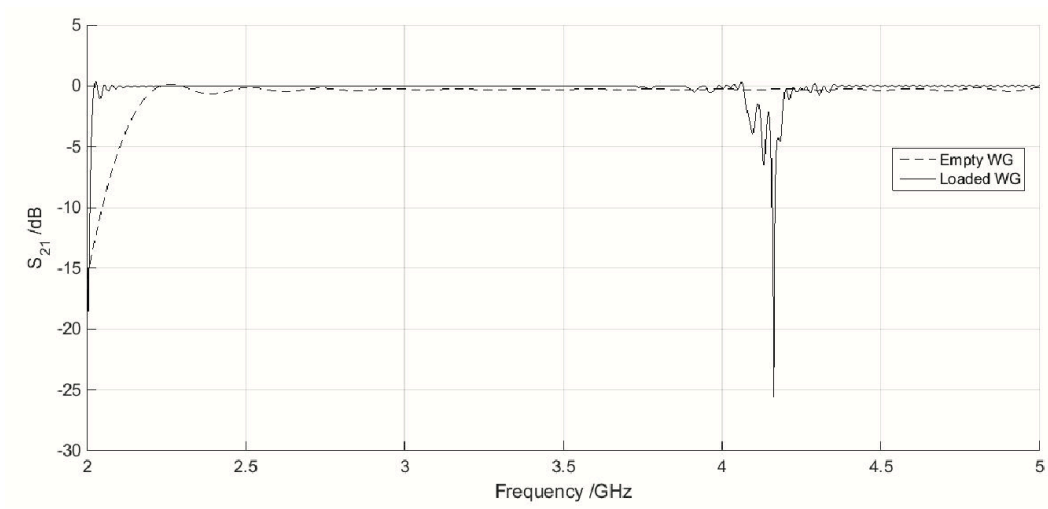


Fig.3 Transmission through Waveguide (WG) loaded with Metamaterial

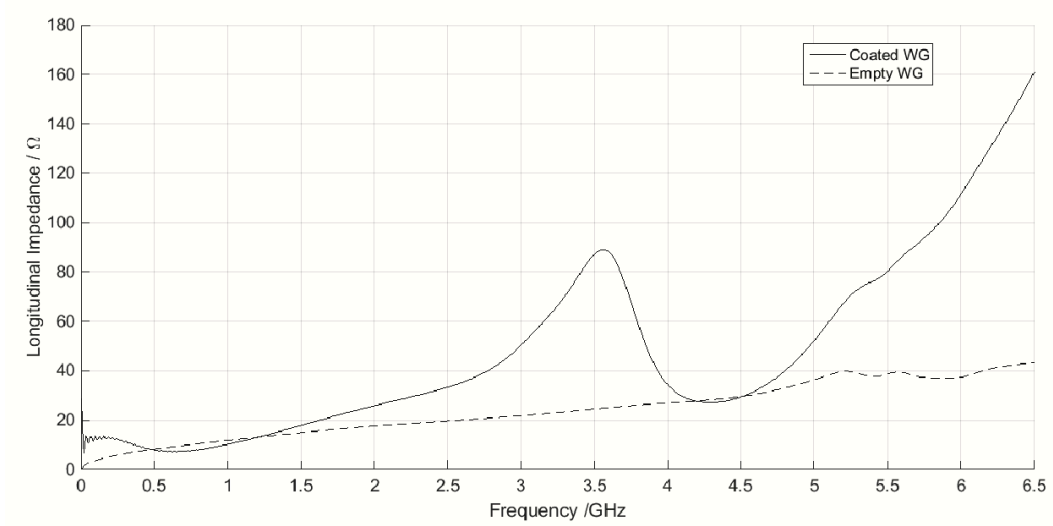


Fig.4 Variation of the Longitudinal Impedance with Frequency along Waveguide (WG).