



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112952532 B

(45) 授权公告日 2022. 11. 22

(21) 申请号 202110109421.8

(22) 申请日 2021.01.27

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112952532 A

(43) 申请公布日 2021.06.11

(73) 专利权人 电子科技大学  
地址 611731 四川省成都市高新区(西区)  
西源大道2006号

(72) 发明人 杨生鹏 宫玉彬 王少萌 王战亮

(74) 专利代理机构 成都行之专利代理事务所  
(普通合伙) 51220  
专利代理师 温利平

(51) Int. Cl.  
H01S 1/02 (2006.01)  
H05H 1/24 (2006.01)

(56) 对比文件

US 5387843 A, 1995.02.07

CN 109904048 A, 2019.06.18

CN 102496678 A, 2012.06.13

V. V. Annenkov. High-power terahertz emission from a plasma penetrated by counterstreaming different-size electron beams. 《PHYSICS OF PLASMAS》. 2018,

审查员 朱海

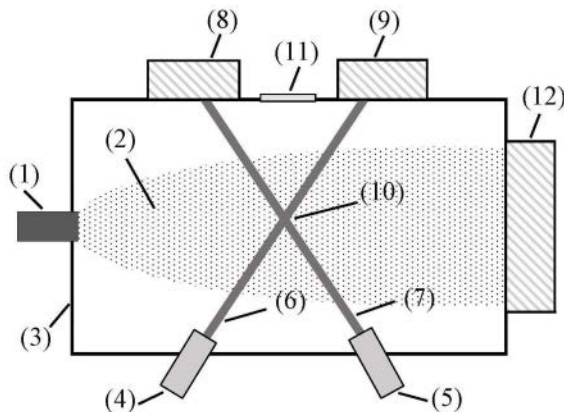
权利要求书1页 说明书4页 附图3页

## (54) 发明名称

基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法,先利用等离子体源电离中性气体,在真空腔内产生一定密度范围的等离子体;再将多个(两个或两个以上)电子束以一定的发射夹角注入等离子体中,通过预先调节电子束之间的发射夹角,使多个电子束在等离子体内部形成会聚点,当多个电子束在等离子体内部会聚到一点,将在此会聚点处激发等离子体波;最后等离子体波将引起电子束会聚点处的电子振荡,从而激发频率位于等离子体频率及其倍频的高功率太赫兹辐射。



1. 一种基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法,其特征在于,包括以下步骤:

- (1)、利用等离子体源电离中性气体,在真空腔内产生一定密度范围的等离子体;
- (2)、预先调节每个电子束之间的发射夹角,使多个电子束在等离子体内部形成会聚点;
- (3)、多个电子束以预先调节的发射夹角注入等离子体中,每个电子束在其通过的路径上激发等离子体波;
- (4)、当多个电子束在等离子体内部会聚时,每个电子束激发的等离子体波将在会聚点处叠加形成一个振幅更强的等离子体波,这个等离子体波再反作用于电子束,使电子束会聚点发生电子振荡;
- (5)、电子振荡激发频率位于等离子体波频率及其倍频的高功率太赫兹辐射。

2. 根据权利要求1所述基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法,其特征在于,所述等离子体波频率 $f_p$ 计算公式为:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{e^2 \rho_0}{\epsilon_0 m_0} \right)$$

其中, $e$ 为电子的电荷量, $\rho_0$ 为等离子体密度, $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $m_0$ 为电子的静止质量。

3. 根据权利要求1所述基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法,其特征在于,所述电子振荡包括:电子束的电子振荡、电子束会聚点位置的振荡、以及会聚点处的等离子体电子振荡。

4. 根据权利要求1所述基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法,其特征在于,所述多电子束在等离子体内部会聚时,至少满足以下三种情况中的一种情况:

- (a) 在多电子束中,存在两个电子束,它们以任意夹角相互穿过彼此;
- (b) 在多电子束中,存在两个电子束,它们相互碰触或发生部分重叠;
- (c) 电子束之间不发生直接相互接触,但存在两个电子束,它们之间的最小间距小于等于10倍的等离子体波波长。

5. 根据权利要求4所述基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法,其特征在于,所述等离子体波波长 $\lambda_p$ 的计算公式为:

$$\lambda_p = \frac{c}{f_p}$$

其中, $c$ 为真空中的光速。

## 基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电磁辐射技术领域,更为具体地讲,涉及一种基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法。

### 背景技术

[0002] 太赫兹辐射指频率位于 $0.1\text{THz}\sim 10\text{THz}$  ( $1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$ ) 的电磁辐射。这一波段的电磁辐射在电磁波谱上占有特殊的位置,属于经典物理到量子物理、电子学到光子学的过渡区域。太赫兹辐射具有一些其它波段的电磁波不具备的物理性质,如:高穿透性、低损伤性、超高带宽、材料指纹谱特性等,在国防、工业、生命科学、物理学等众多领域都具有广阔的应用前景。

[0003] 作为太赫兹辐射众多应用的基础,太赫兹源具有重要的研究价值。近年来,一种新型的太赫兹源引起了人们的广泛关注,这种太赫兹源基于电子束与等离子体的相互作用,称作“束—等离子体系统”。

[0004] 现有的束—等离子体系统如图1所示,该系统采用一个相对论电子束穿过一个被磁场线圈磁化的等离子体柱。在此过程中,电子束将驱动一个沿着电子束传播的等离子体波,这个等离子体波在磁化等离子体中将与电磁波耦合,通过模式转换的方式激发高功率太赫兹辐射。然而,目前这种方法仍然存在以下缺点:1、辐射机制依赖于强磁场( $\sim\text{T}$ )以强流相对论电子束(电压 $\sim\text{MV}$ ,电流 $\sim\text{kA}$ ),因此辐射源体积庞大且造价高昂;2、电子束、等离子体与电磁波三者之间的互作用区域通常有数米长,在此区域内很难维持良好的等离子体均匀性,而不均匀的等离子体分布将扰乱辐射频谱,使辐射相干性变差。3、辐射的方向性不可控制。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于克服现有技术的不足,提供一种基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法,通过多电子束与等离子体相互作用的新物理机制,来解决现有束—等离子体系统太赫兹源体积大、造价高、频谱杂乱、相干性和方向性差的缺点。

[0006] 为实现上述发明目的,本发明一种基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0007] (1)、利用等离子体源电离中性气体,在真空腔内产生一定密度范围的等离子体;

[0008] (2)、预先调节每个电子束之间的发射夹角,使多个电子束在等离子体内部形成会聚点;

[0009] (3)、多个电子束以预先调节的发射夹角注入等离子体中,每个电子束在其通过的路径上激发等离子体波;

[0010] (4)、当多个电子束在等离子体内部会聚时,每个电子束激发的等离子体波将在会聚点处叠加形成一个振幅更强的等离子体波,这个等离子体波再反作用于电子束,使电子束会聚点发生电子振荡;

[0011] (5)、电子振荡激发频率位于等离子体波频率及其倍频的高功率太赫兹辐射。

[0012] 本发明的发明目的是这样实现的：

[0013] 本发明基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法，先利用等离子体源电离中性气体，在真空腔内产生一定密度范围的等离子体；再将多个（两个或两个以上）电子束以一定的发射夹角注入等离子体中，通过预先调节电子束之间的发射夹角，使多个电子束在等离子体内部形成会聚点，当多个电子束在等离子体内部会聚到一点，将在此会聚点处激发等离子体波；最后等离子体波将引起电子束会聚点处的电子振荡，从而激发频率位于等离子体频率及其倍频的高功率太赫兹辐射。

[0014] 同时，本发明基于多电子束与等离子体相互作用的太赫兹辐射产生方法还具有以下有益效果：

[0015] (1)、采用本发明，可实现输出功率超过百瓦量级、具有良好的相干性与方向性的太赫兹辐射。

[0016] (2)、相比于现有的束—等离子体系统太赫兹源，本发明体积小、成本低且不需要外加强磁场。

[0017] (3)、太赫兹辐射的频谱纯净，频率和方向可以灵活调节。

## 附图说明

[0018] 图1为现有的束—等离子体系统太赫兹源示意图。

[0019] 图2为本发明基于多电子束与等离子体相互作用产生太赫兹辐射的具体实施框图，图中(1)为等离子体源，(2)为等离子体，(3)真空腔，(4)、(5)为电子枪，(6)、(7)为电子束，(8)、(9)为电子束收集极，(10)为电子束会聚点，(11)为辐射窗口，(12)为等离子体收集极。

[0020] 图3为PIC模拟得到的电子束与等离子体电子密度 $n_{pe}$ 的分布。

[0021] 图4为PIC模拟得到的辐射场空间分布。

[0022] 图5为PIC模拟得到的辐射波形(a)和辐射频谱(b)。

## 具体实施方式

[0023] 下面结合附图对本发明的具体实施方式进行描述，以便本领域的技术人员更好地理解本发明。需要特别提醒注意的是，在以下的描述中，当已知功能和设计的详细描述也许会淡化本发明的主要内容时，这些描述在这里将被忽略。

[0024] 实施例

[0025] 图2为本发明基于多电子束与等离子体相互作用产生太赫兹辐射的具体实施框图。

[0026] 在本实施例中，如图2所示，以两束电子与等离子体相互作用产生太赫兹辐射进行详细说明，具体包括以下步骤：

[0027] S1、利用等离子体源(1)电离中性气体，在真空腔(3)内产生一定密度为 $10^{19}\text{m}^{-3}\sim 10^{25}\text{m}^{-3}$ 的等离子体(2)，等离子体在真空腔(3)内定向运动，最终被等离子体收集极(12)吸收；另外，还可以通过调节等离子体密度的方式，将辐射频率推广至其它任意频段，如：微波波段、红外波段等。

[0028] S2、预先调节两个电子枪(4)、(5)的夹角,使它们发射的电子束能够在等离子体内部形成会聚点(10),且最终被电子束收集极(8)、(9)吸收。在本实施例中,当多电子束在等离子体内部会聚时,至少满足以下三种情况中的一种情况:(a)在多电子束中,存在两个电子束,它们以任意夹角相互穿过彼此;(b)在多电子束中,存在两个电子束,它们相互碰触或发生部分重叠;(c)电子束之间不发生直接相互接触,但存在两个电子束,它们之间的最小间距小于等于10倍的等离子体波波长,等离子体波波长 $\lambda_p$ 的计算公式为:

$$[0029] \quad \lambda_p = \frac{c}{f_p}$$

[0030] 其中,c为真空中的光速。

[0031] S3、电子枪(4)、(5)发射两个电子束(6)、(7),两个电子束以预先调节的发射夹角注入等离子体(2)中,两个电子束在其通过的路径上激发等离子体波;其中等离子体波是等离子体物理领域的基本概念,以下名称仍然属于等离子体波的范畴:电子等离子体波、电子静电波、电子密度波、静电波、朗缪尔波、空间电荷波、等离子体尾场、等离子体振荡、等离子体电子振荡、静电振荡。

[0032] S4、当两个电子束(6)、(7)在等离子体(2)内部会聚时,两个电子束激发的等离子体波将在会聚点(10)处叠加形成一个能量更强的等离子体波,这个等离子体波再驱动电子束,使电子束会聚点发生电子振荡,此处的电子振荡包括:电子束的电子振荡、电子束会聚点位置的振荡、以及会聚点处的等离子体电子振荡。

[0033] S5、电子振荡激发频率位于等离子体波频率及其倍频的高功率太赫兹辐射,太赫兹辐射最终通过辐射窗口(11)输出;电子振荡的频率为等离子体波频率 $f_p$ ,具体计算公式为:

$$[0034] \quad f_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{e^2 \rho_0}{\epsilon_0 m_0} \right)$$

[0035] 其中,e为电子的电荷量, $\rho_0$ 为等离子体密度, $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $m_0$ 为电子的静止质量。

[0036] 本实施例采用particle-in-cell(PIC)粒子模拟代码对图2中的太赫兹源进行物理建模和仿真。模拟中采用的等离子体密度为 $3.1 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ ,相应的等离子体频率为0.5THz。这种密度量级的等离子体可以通过电离中性气体的方式产生。模拟中设置了两个电子束,它们之间的夹角为40度。本实施例采用的电子束直径为0.36mm,电子束密度为 $1.0 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ ,束电压为50kV,电流为8A。相比于如图1所示的背景技术方案(束电压为数千kV,电流为数千A),本实施例大幅降低了参数要求,使束一等离子体系统更加适合于小型化装置,同时也节约了成本。

[0037] 图3显示了电子束与等离子体电子密度的分布。

[0038] 图3中电子束激发的等离子体波引起了等离子体电子密度的波动,这种密度波动使电子束的会聚点(白色圆点)偏离了其平衡位置(白色虚线),朝着等离子体电子密度低的区域(白色区域)运动。图3(a)和3(b)分别展示了时间为180ps和181ps时的会聚点位置,它们的时间间隔正好为等离子体振荡的半个周期。如图3(a)所示,此时会聚点位于平衡位置下方;经过半个周期后,如图3(b)所示,会聚点运动到了平衡位置上方。这样,电子束将在等

离子体波的驱动下,在平衡位置两侧来回振荡,振荡频率为等离子体频率。另一方面,如果将等离子体电子密度低的区域看作为一个势阱,电子束会聚点在被该势阱捕的过程中还能够引起高倍频的振荡。上述这些振荡方式都可以成为激发太赫兹辐射的源。

[0039] 图4展示了电子束会聚点振荡导致的太赫兹辐射场空间分布。

[0040] 由图4可知,太赫兹辐射正是从电子束会聚点的位置发射而出,主要集中在两个电子束的夹角之间,辐射的方向可以随着电子束夹角的改变而改变。与此同时,辐射场的空间波形也展现出了很好的相干性。图中电子束发射端到会聚点的距离仅为3.6mm,这意味着辐射能够在毫米尺度的相互作用范围内实现。因此这样的束—等离子体系统太赫兹源不仅能够实现小型化,也能够更好地确保等离子体密度分布的均匀性,这有利于克服现有束—等离子体系统太赫兹源频谱杂乱的缺点。

[0041] 在图4中取距离会聚点3.6mm,偏离对称轴 $5^\circ$ 的一点对辐射场进行监测,可以得到辐射场随时间变化的波形,如图5(a)所示。对图5(a)的波形进行傅里叶变换可以得到如图5(b)所示的纯净辐射频谱。图中的频率最低的模式出现在0.5THz,此处为等离子体频率。辐射场最强的模式位于1THz,此处为等离子体频率的二倍频,其带宽为6GHz。除此之外,其它模式出现在等离子体频率的更高倍频处,但幅值远小于二倍频模式。对辐射场的功率密度进行积分后可以计算得出辐射的平均功率为180W。

[0042] 尽管上面对本发明说明性的具体实施方式进行了描述,以便于本技术领域的技术人员理解本发明,但应该清楚,本发明不限于具体实施方式的范围,对本技术领域的普通技术人员来讲,只要各种变化在所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内,这些变化是显而易见的,一切利用本发明构思的发明创造均在保护之列。

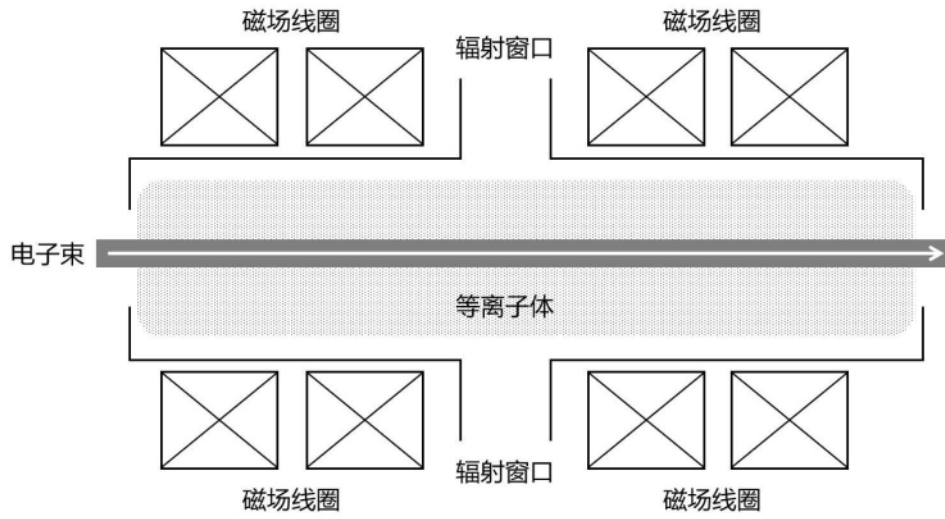


图1

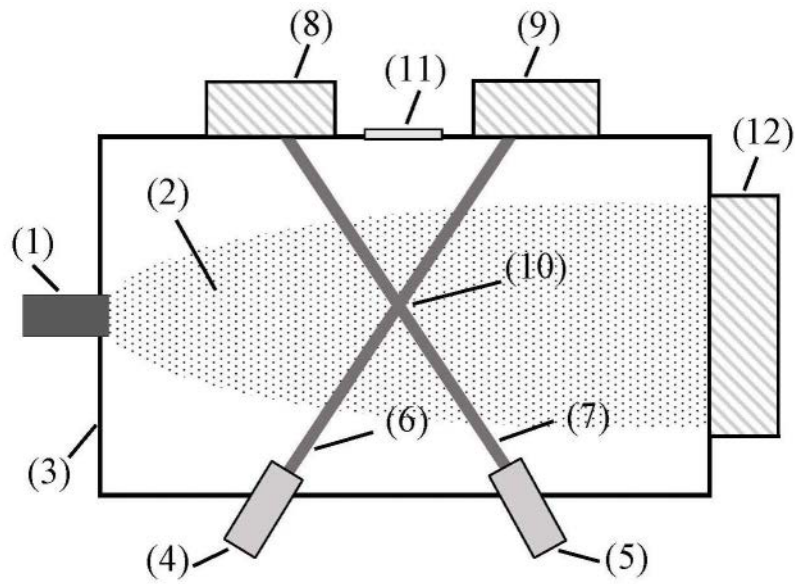


图2

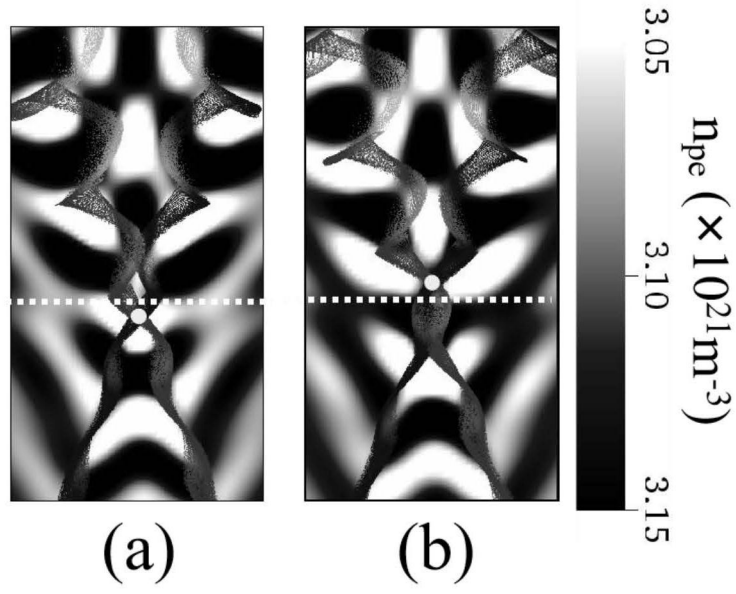


图3

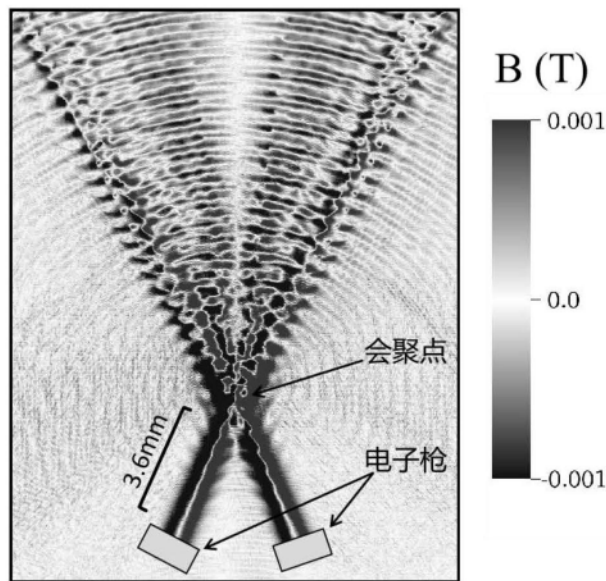


图4



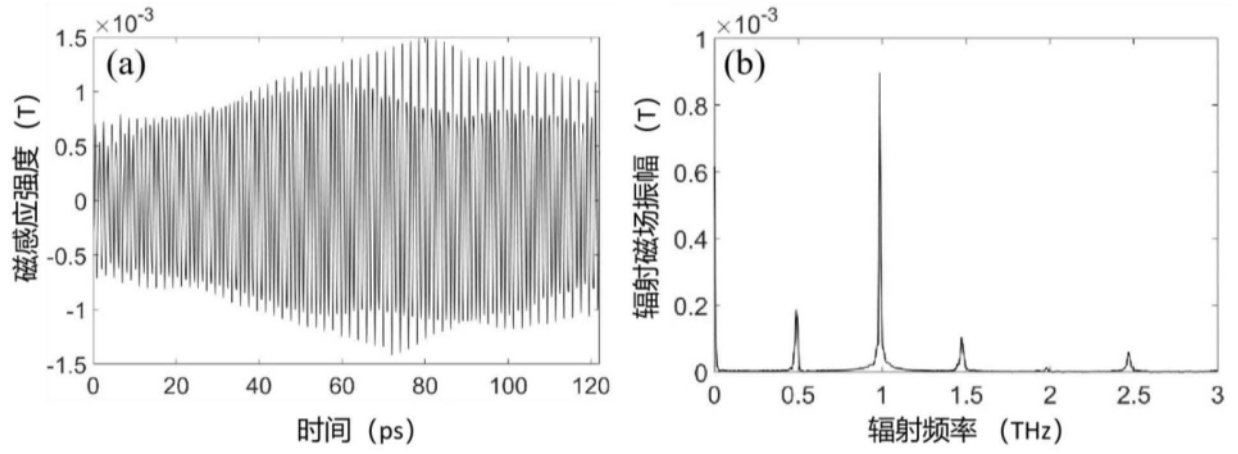


图5