

## 射频调制电子束和 X 射线束在空气中的传播和检测

JR哈里斯, CN哈里斯, RB米勒, 和NT 迈尔斯

引文: 《应用物理学杂志》 123, 223303 (2018); doi: 10.1063/1.5029938 在线查看: <https://doi.org/10.1063/1.5029938>

查看目录: <http://aip.scitation.org/toc/jap/123/22>

美国物理学会出版

---

您可能感兴趣的文章湍流对大气压交流滑动

电弧放电的影响[应用物理杂志](#)123, 223302 (2018); 10.1063/1.5026703

利用光纤布拉格光栅传感器观测大面积、甚高频电容耦合等离子体中的驻波效应[应用物理杂志](#)123, 223304 (2018); 10.1063/1.5024835

太赫兹脉冲在矩形亚波长介质波导中的传播[应用物理杂志](#)123, 223103 (2018); 10.1063/1.5030515

电离速度对充气二极管电流和电压的影响[应用物理杂志](#)123, 203302 (2018); 10.1063/1.5026030

关于ATON型霍尔效应推力器中阳极环与磁场的匹配[应用物理杂志](#)123, 223301 (2018); 10.1063/1.5026486

大气中电场诱导的二次谐波产生飞秒脉冲[应用物理快报](#)112, 241101 (2018); 10.1063/1.5030171

---



## 射频调制电子束和 X 射线束在空气中的传播和检测

JR 哈里斯<sup>1</sup>, CN 哈里斯<sup>1</sup>, RB 米勒<sup>2</sup>, 和 NT 迈尔斯<sup>3</sup>

<sup>1</sup>定向能理事会, 空军研究实验室, 美国新墨西哥州阿尔伯克基 87106

<sup>2</sup>EBM, LLC, 美国新墨西哥州阿尔伯克基 87110

<sup>3</sup>Verus Research, 美国新墨西哥州阿尔伯克基 87110

(2018 年 3 月 16 日收到; 2018 年 5 月 26 日接受; 2018 年 6 月 12 日在线发表)

RF 线性加速器产生的电子束自然会以 RF 频率进行调制。我们在此报告了对在空气中滑行的 21.6 MeV 电子束的 RF 谐波含量以及该电子束产生的 X 射线的 RF 谐波含量的测量结果, 以及这些调制的电子束和 X 射线束对几种快速检测系统的影响。我们发现 RF 基波及其高次谐波会印在电子束产生的 X 射线上, 并且 RF 波导对调制 X 射线信号通过的响应表明, 这种谐波含量也会印在 X 射线通过波导产生的二次电子上。观察到一种意想不到的干涉效应, 当波导受到调制 X 射线的撞击时, 这种效应尤为突出。X 射线通过波导上游的 X 射线转换器产生的二次电子的参与被排除在外, 这不是造成这种影响的重要因素。 <https://doi.org/10.1063/1.5029938>

### 一、引言

调制电子束的产生和使用是粒子加速器和真空电子学的诸多技术和应用的核心。所有电子束都经过一定程度的调制, 强调制可通过多种方式实现, 包括电子束源门控 1–6 或通过与射频直线加速器中的场相互作用。即使在研究最多的真空中传播,<sup>7–10</sup> 光束调制也会通过空间电荷波演化,<sup>1,11,12</sup> 通过孔径,<sup>13,14</sup> 与慢波,<sup>15</sup> 电阻,<sup>7</sup> 或磁结构,<sup>16</sup> 和非线性过程发生变化。<sup>17,18</sup> 光束的横向和纵向动力学也将通过光束中的空间电荷耦合。<sup>7,19–21</sup> 这种调制电子束也可以在空气中传播, 尽管这会引入其他相互作用, 例如散射、等离子体过程和二次辐射产生。<sup>8</sup> 当使用调制电子束产生 X 射线时, 这些 X 射线可能保留一些原始电子束的调制,<sup>22</sup> 并且调制电子和 X 射线

直接测量射频直线加速器在空气中滑行时产生的电子束的射频频率内容, (2) 直接测量该调制电子束产生的 X 射线的射频频率内容, (3) 测量这些电子和 X 射线与射频结构相互作用时产生的信号的射频频率内容。

这项测试是使用爱达荷加速器中心 (IAC) 的 25 MeV S 波段电子直线加速器完成的。<sup>30</sup> 使用 (1) 无偏金刚石辐射测量二极管、(2) S 波段波导、(3) S 波段药盒腔和 (4) B\_环路, 在电子束和由此产生的 X 射线中检测了加速器的 2856 MHz RF 频率及其谐波。这些测量证实, 当初级电子撞击金属物体时产生的 X 射线束中保留了 RF 基波和高次谐波, 并且 X 射线束撞击金属物体时产生的二次电子中仍保留了 RF 基波和高次谐波。这项测试的一个令人惊讶的结果是, 随着下游距离的变化, 在这些 RF 设备中感应的信号中观察到了明确的零点。这些零点在射频调制的 X 射线束和较大面积的目标中表现得最为明显, 这表明由于在不同位置产生的微波信号和射频结构中的不同相位延迟相互作用而发生了意外的干扰过程。

光束可以与快速电子和射频设备相互作用,

可用于检测这种调制。<sup>23</sup> 调制的 X 射线束在航天器通信<sup>24–28</sup> 和测距<sup>29</sup> 应用中引起了越来越大的关注。

在之前的一组实验中,<sup>22</sup> 我们研究了射频调制电子束在空气和金属中的传输, 重点是了解它们随后与射频腔和波导的相互作用。这些结果表明, 即使电子束穿过空气和相当厚的金属, 其射频调制至少在一定程度上得以保留。他们还表明, 这种调制不仅影响了这些电子束产生的 X 射线, 还影响了这些 X 射线穿过金属腔和波导时产生的二次电子。为了验证这一点, 我们寻求 (1)

我们将在本文中详细讨论结果。

第二部分将介绍我们的实验设备和测量技术。我们的主要实验结果将分为三部分, 第三部分介绍空气中的电子束传输, 第四部分介绍射频调制 X 射线在空气中的传输, 第五部分简要描述电子束撞击铝板的测试。第六部分将详细介绍为评估二次电子在产生干涉状零点中的作用而进行的测量, 我们的结果将在第七部分中总结。

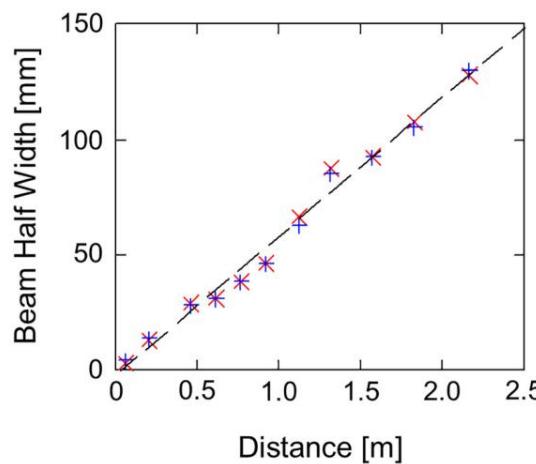


图 1. 电子束包络。垂直 (蓝色  $\text{b}$ ) 和水平 (红色  $\text{x}$ ) 半宽作为距离的函数,与截距为的线性拟合相比 2 毫米,斜率为 60.103。

## 2 实验装置

这里报告的实验是使用用 25 MeV S 波段射频产生的电子束 IAC 的直线加速器。这台机器是 Varian Clinac, 表现出非常稳定且可重复的操作, 因此非常适合这项工作。该机器的光束能量为 21.6 MeV, 标称束流为 95 mA, 宏脉冲长度为 4 ls, 束流通过 1 mil 提取。机器零度端口上的钛箔光束窗口。测量空气中的电子束包络时, 将玻璃在光束窗口下游不同距离处放置板, 并利用玻璃中产生的变色来表示光束尺寸。本次测量的结果是如图 1 所示。梁包络在水平和垂直方向且近似线性。随着距离的增加, 光束的半宽可以用以下公式很好地描述:

$$\text{时长}: 0:002 + 0:06 \text{分钟} : (1)$$

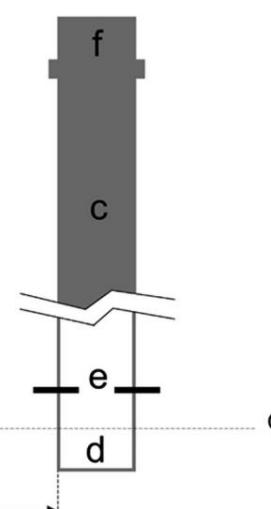
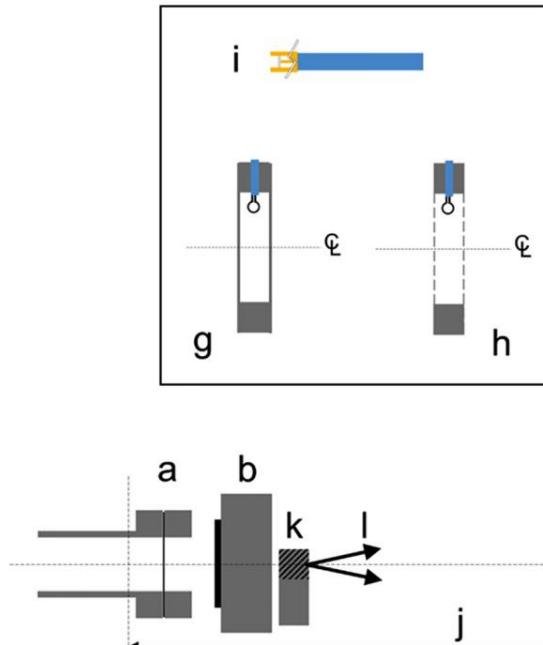


图 2. 本文讨论的测试配置示意图 (不

比例) : (a) 光束管和 0.254 厘米 Ti 箔束窗口; (b) X 射线转换器; (c) S 波段波导, 具有相互作用区域 (d), 由变量定义; 虹膜 (e) 并终止于波导到同轴电缆的转换 (f); S 波段; 碲堡腔采用带末端的 B\_拾音器; 安装板 (g) 并带有端板; 删除 (h) (类似于左上角和图 3 中的右上面板); 金刚石二极管探测器并入 SMA 母连接器

(i) 下游距离 (j) 是相对于光束稍上游的参考位置测量的。窗口如图 (a) 所示。在某些测试, 0.1 T 永磁体 (k) 被添加, 目的是将二次电子偏转到标称光束路径 (l)。

可以使用 x 射线产生 x 射线。转换器由 0.254 厘米宽的箔组成, 安装在水冷式 2.29 厘米铝块 (图 2)。一些测试也使用薄铝板放置在紧邻下游的位置。

为了检测电子和 X 射线信号的调制, 我们使用了几种技术 (图 2)。第一种是钻石二极管专为辐射测量而设计, 由阿拉米达应用科学公司制造。<sup>31</sup> 在正常操作时, 它们偏置为 150 V 并连接到通过集总元件高通滤波器示波器。虽然这种安排足够快, 可以轻松解决光束的包络, 无法解析光束的与 RF 周期相当的时间尺度结构。

然而, 移除滤波器后, 二极管保持无偏置, 直接连接到 IAC 的 Tektronix DPO 71604 16 GHz 示波器。射频波束调制规模问题可以得到解决。尽管这种安排仍然速度太慢, 无法完全测量个体的形状微脉冲, 它确实能够提取光束上携带的前六个射频谐波 (2856、5712、8568、11424、14280 和 17136 MHz) 使用示波器的快速傅里叶变换 (FFT) 能力。报告这些谐波的幅度将是我们在本文中呈现实验数据的主要手段。

所用的第二种技术是配备弱谐振

一端为腔体, 与波导的其余部分隔开。通过可调宽度的光圈 (图 2 和图 3)。<sup>22</sup> 在测试中据报道, 虹膜被设置为提供品质因数 ( $Q$ ) 大约 60。在波导的另一端从腔体到波导的过渡, 以及本工作中, 波导直接通过通过衰减器过渡到 16 GHz 范围, 如上所述进行测量。在测试中, 波导对准, 使标称光束轴垂直于波导的长边, 光束轴

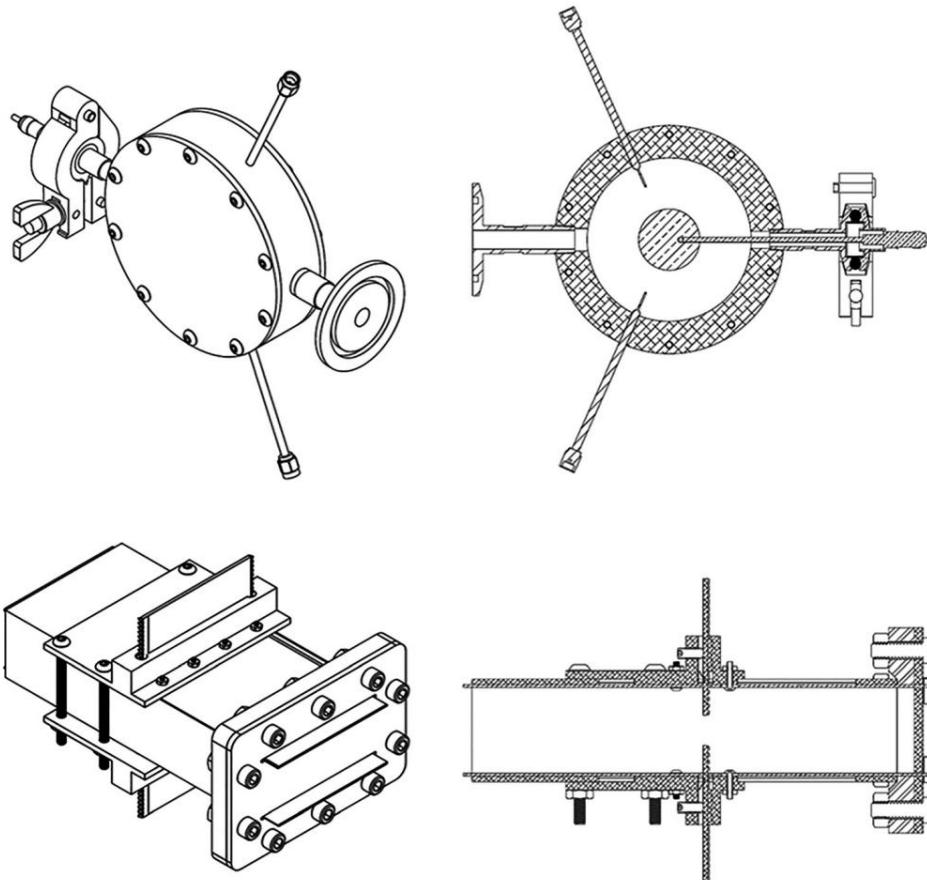


图 3. S 波段腔体（顶部）和 S 波段波导可变几何相互作用区域（底部）的外部和横截面图。

S 波段腔体图显示了两个天线，而实际实验中仅使用了一个拾音环。

另外，腔体上安装有电荷收集板；这在本文报告的测试中并未使用（来自参考文献22）。

位于距腔端  $1/4$  波长（2856 MHz）处，以优化波导中初级电子束通过时微波的生成。由于波导将支持 2856 MHz 频率及其更高谐波，因此光束上存在的任何此类内容都可以在波导中生成微波信号。为了使 X 射线通过波导产生微波，这些 X 射线必须在波导内产生二次电子，而这又要求二次电子（以及入射 X 射线）必须在波导可以支持的 RF 频率下进行调制。

光束引入的其他频率成分相对于基频而言受到抑制。然而，S 波段波导不仅能够支持 2856 MHz 基频，而且能够支持其高次谐波。

采用在铝制框架中的一对钢轨上运行的电机驱动定位系统来调整这四个检测系统的位置，通过使用可见对准激光将其与标称光束路径对准，并相对于光束线上的参考点进行测量，该参考点位于光束窗口的略上游（图2）。

第三和第四种技术使用了 S 波段药盒腔，之前在参考文献22中详细描述过，配备了拾音器（B\_）环路来检测方位磁场，并调谐至 2854 MHz， $Q$  为 248（图2 和 3）。

腔体也被去掉了端板，破坏了腔体谐振，但允许 B\_ 环直接感应光束场（图2 和 4）。

请注意，每种技术都略有不同，因此对辐射的反应也不同。

无偏金刚石二极管探测器对

沉积在其上的电荷。它和 B\_ 环路（检测方位磁场和直接沉积在其上的电荷）是光束的最直接测量。S 波段腔体和波导的输出主要不是来自光束本身，而是来自这些结构内部通过初级电子束或 X 射线束通过产生的二次电子产生的微波信号。由于腔体仅在 2856 MHz 的基频下共振，因此所有

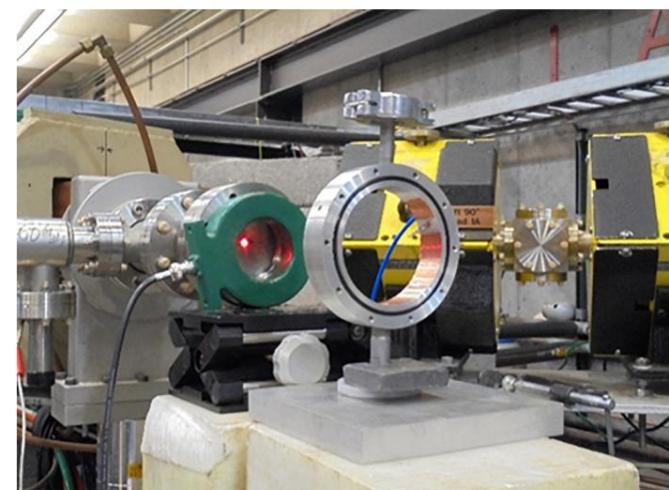


图 4. 安装在光束线上的 S 波段腔体，端壁已拆除（摘自参考文献22）。

### III. 电子束在空气中的传播

使用上面讨论的所有四种技术对在空气中传播的电子束进行了测量。

在每种情况下,该设备都直接连接到 16 GHz 示波器 (在某些情况下通过衰减器),该示波器的速度足够快,可以部分解析电子束信号的纵向结构。对该信号进行了两种类型的测量。首先,使用示波器对信号进行快速傅里叶变换 (FFT),提取光束信号的谐波分量的幅度。使用二极管检测器,在理想条件下,可以检测到基波和接下来的五个高次谐波,而在其他情况下,可以检测到较少的高次谐波。FFT 峰值的强度,特别是高次谐波的强度,有时太小而无法在背景之上识别。谐波的相对强度以 dB 为单位报告,尽管不同测量中使用的示波器设置和衰减器不同,因此无法提供不同测量之间谐波强度的定量比较。第二种测量类型是示波器检测到的光束诱导信号的峰峰值电压。

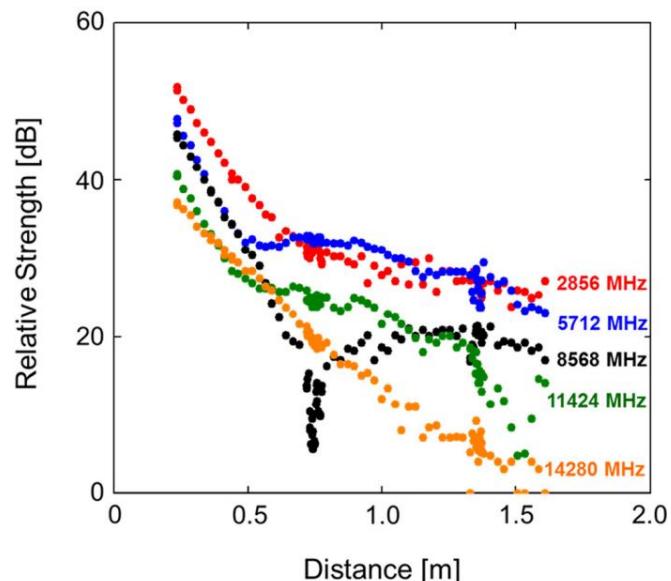


图 6. 用金刚石二极管探测到的电子束信号的前五个谐波的相对强度与距离的关系。

### A.二极管

#### 两组电子束测量结果

用金刚石二极管拍摄的。第一次低空间分辨率扫描的结果如图 5 所示。该图显示了测量的六个谐波的信号强度与距离的关系。在这个特定的数据集中,测量中的误差估计为  $\pm 0.75$  dB,噪声基底约为 63 dB。虽然 17136 MHz 谐波名义上高于示波器的 16 GHz 截止频率,但在这次测量中可以非常清楚地识别它。

第二组测量旨在提供更高的空间分辨率,结果如图 6 和图 7 所示。图 6 显示了通过 FFT 检测到的金刚石二极管上的电子束信号的 RF 频率的前五个谐波的相对强度,与距离的关系。对于前 50 厘米,所有谐波的强度都在稳步下降。在 50 厘米处,5712 MHz 信号经过最小值并略有增加,然后以减小的斜率下降,而基波和 11424 MHz 分量经历了拐点,8568 MHz 谐波在 74 厘米处达到急剧的最小值。

在此位置之后,前四个谐波的下降通常较慢,而第五个谐波的下降基本保持不变。存在额外的最小值,最明显的是 84、115 和 151 厘米处的第四个谐波。基波中没有明显的最小值或零值。

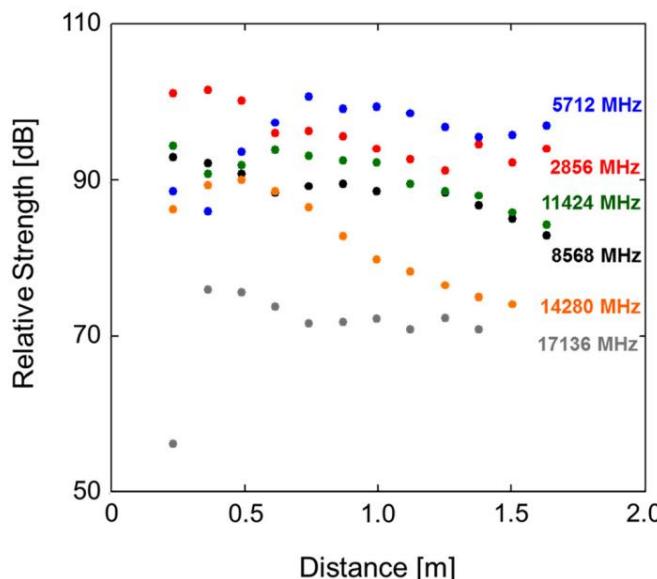


图 5. 初始测量期间用金刚石二极管检测到的电子束信号的前六个谐波的相对强度与距离的关系。

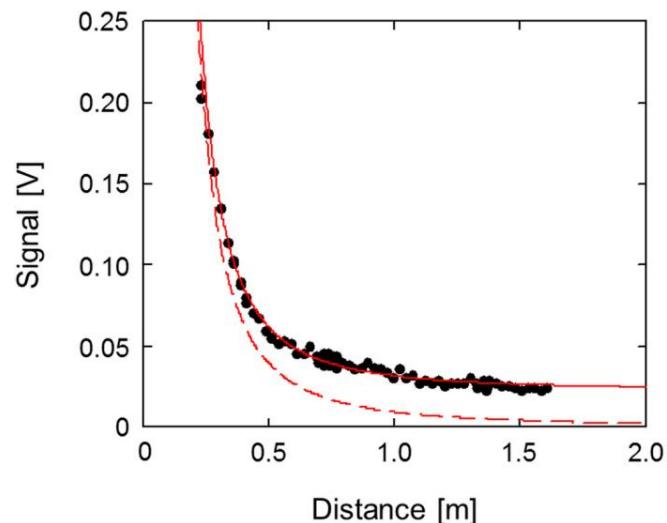


图 7. 使用二极管 (点) 测量的峰峰值信号与具有 (实线红色) 和不具有 (虚线红色) 背景信号的光束密度计算的信号进行比较。

比较图5的低分辨率扫描和图6的高分辨率扫描有些困难。在这两种情况下,2856 MHz 基波的强度都高于 5712 MHz 谐波的强度,直到大约 60 cm 处,此后后者通常更强。在每个数据集中,5712 MHz 谐波在此点之前都会经历最小值,但该位置在低分辨率数据中为 36 cm,在高分辨率数据中为 57 cm。高分辨率数据中 8568 MHz 谐波在 74 cm 处的明显最小值在低分辨率数据中缺失,在 61 cm 处显示出一个弱最小值。同样,高分辨率扫描中 11424 MHz 谐波在 151 cm 处的强最小值在低分辨率数据中不存在。

两次扫描的空间分辨率不同似乎本身并不能解释这些差异,因为低分辨率扫描中的几个数据点是在高分辨率扫描中高次谐波的宽最小值内采集的。这两次测量是在不同的日期进行的,虽然加速器和测试配置被认为是相同的,但这些差异最有可能的解释在于系统中未注意到的变化。两次测量使用了不同的示波器设置,因此谐波分量的幅度不同。

图 7 显示了在高空间分辨率扫描期间用二极管测得的峰峰值信号幅度与二极管位置的关系。该数据并不完全遵循预期的平方反比定律关系。

从图1 所示的测量束流包络线,我们已经推断出近似的束流包络线  $w \propto z^{\alpha}$ ,如公式(1) 所示。这意味着束流电流密度为

$$\text{星期日 } \propto 0.095A = pw z^{\alpha} \propto z^2 \quad (2)$$

在正常运行中,金刚石元件偏置电压为 150 V,以提取入射辐射释放的自由电荷载流子。但是,我们是在无偏模式下使用它,因此金刚石元件本身可能是惰性的,但容纳它的 SMA 母连接器充当电荷收集器(或发射器,取决于其二次电子产率)。假设电荷拦截面积由内径 2.54 毫米定义,将公式(2)乘以该面积,然后将计算出的电流乘以 50 X,可得出预测的信号电压幅度与距离的关系。这由图7 中的红色虚线表示,显然不足以解释数据。但是,当我们假设一个额外的恒定背景相当于 22 A/m<sup>2</sup> 时,就会生成红色实线,这与数据具有合理的一致性。需要注意的是,探测器中电子束的范围比探测器的尺寸要长得多,因此完整的分析需要结合探测器产生的二次电子。另外,请记住,这里绘制的信号强度是在示波器上测得的峰峰值电压。任何噪声或直流偏移都不会以这种方式影响峰峰值电压。相反,“背景”信号必须具有相同的脉冲结构并以与电子束脉冲序列相同的相位到达。这可能是由于

环境中存在的额外 x 射线辐射,其产生的脉冲结构与原电子束相同。事实上,当二极管靠近光束线但远离光束窗口时,可以检测到一个小的背景信号,该信号被认为是由于 x 射线引起的,它保留了原电子束本身的谐波含量。当二极管和光束线之间的视线被铅砖挡住或移到安装实验的重金属桌子下面时,这个信号就消失了。请注意,在约 0.5 米处,数据从受平方反比定律(可能由于原电子)主导转变为背景水平(可能由于 x 射线),这也是图6中所示谐波含量发生显著变化的开始,并在上文中进行了讨论。在此位置,等式(1)显示光束半宽小于 3 厘米,因此尚未扩展到可以撞击安装实验的轨道或桌子并在此过程中产生额外背景辐射的程度。图7所示的峰峰值信号电压中没有出现零点。

## B. B\_环

图 8 显示了用 B\_环(如图 4 所示,移除了端板的 S 波段腔体)测量的电子束。谐波强度随距离增加而平稳减小,唯一的主要零点出现在 1.13 米附近的 11424 MHz 信号中,而较弱的零点出现在 139 厘米处的 14280 MHz 信号中。请注意,在这种情况下,谐波的相对强度似乎没有发生显著变化。

## C. 腔体

图9和图10显示了在电子轰击下 S 波段腔体中感应的信号随位置的变化测量值。峰峰值信号强度和基波非常强,因此 5 倍衰减器

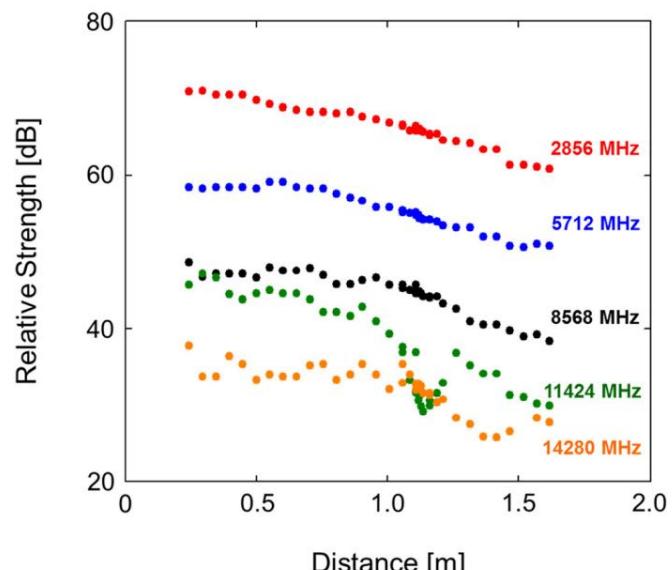


图 8. 利用 B\_环路检测到的电子束信号的前五个谐波的相对强度,作为距离的函数。

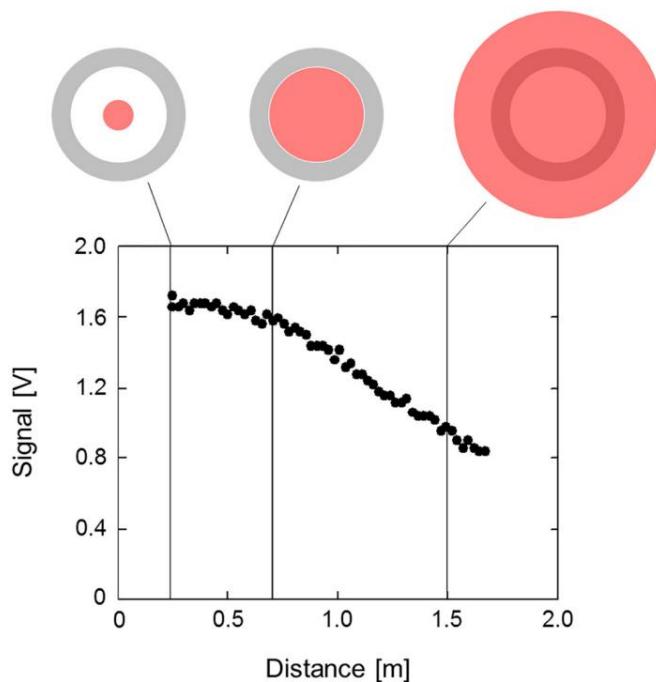


图 9. 使用腔体测量的峰峰值信号。顶部的图像比较了腔体尺寸（灰色）和光束尺寸（红色），使用方程(1) 中光束半宽的拟合。

在这些测量过程中安装了。除了基波外，没有看到明显的谐波内容，因为腔体在高次谐波处不共振。虽然腔体不能支持这些模式，但它们仍然存在于光束中， $B_{\perp}$  环路将检测到它们，因此腔体在基波和高次谐波处的响应差异是共振和非共振光束-腔体相互作用的相对强度的量度。没有明显的零点。当光束半宽等于腔体内半径 4 厘米时，信号强度的斜率发生明显变化（图 9）。在比这更近的距离，

光束填充腔体不足，因此其所有电流都有助于驱动腔模式，而在大于此距离时，光束会过度填充腔体，因此越来越多的光束不会参与驱动腔模式。

#### D. 波导

图 11 显示了 S 波段波导对电子束的响应。相互作用区域光圈已调整为在 2856 MHz 处提供宽谐振，该谐振频率为 10 MHz 宽，并且在波导和示波器之间使用了 20 dB 衰减器。数据中没有零点。如前所述，这不是对光束谐波含量的直接测量，而是对电子束通过时在波导内部产生的微波频率含量的测量，以及由一次电子束在波导内部产生的二次电子的频率含量的测量。因此，与使用金刚石二极管和  $B_{\perp}$  环路的更直接测量相比，指示的频谱存在差异。例如，在这种情况下以及在部分 S 波段腔体测量中，11424 MHz 信号都比 5712 MHz 信号强。然而，在下游 50 cm – 60 cm 处，数据集的形状似乎再次发生变化，如 S 波段腔体测量结果所示，在这种情况下，2856、11424 和 5712 MHz 谐波的曲线陡度增加，而 8568 和 14280 MHz 谐波消失。同样，这种影响可能是几何的。

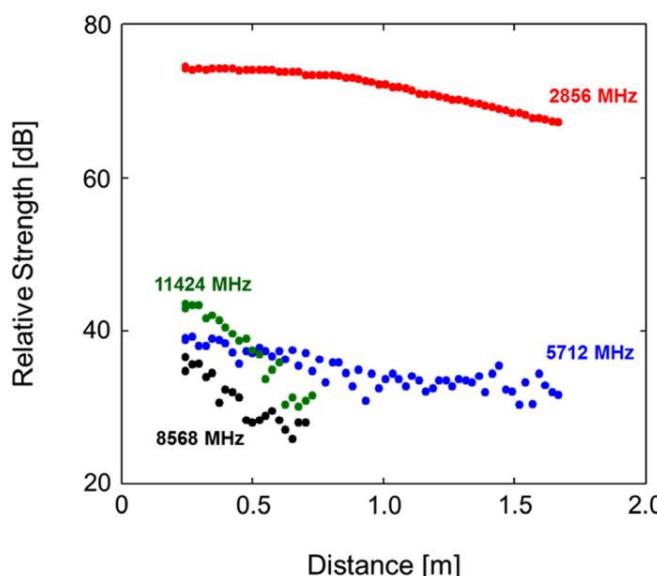


图 10. 利用 S 波段腔体探测到的电子束信号的前四个谐波的相对强度与距离的关系。

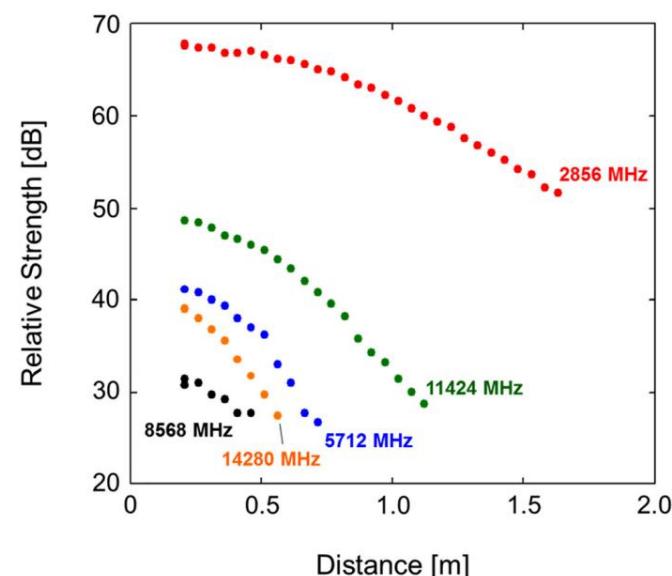


图 11. 利用波导检测到的电子束 RF 频率的前五个谐波的相对强度，作为距离的函数。

超过这个点,光束半径的增加将增加通过波导上方和下方的光束部分,以及超过了它的终点,降低了交互效率。

#### IV. X射线转换器

为了进行这些测量,安装了 x 射线转换器如图 2 所示,位于光束窗口的下游。

##### A.二极管

使用二极管测量 x 射线信号随空气中距离的变化。

X 射线束的可测量信号强度明显小于电子束,并且信号可能

只能在更短的距离内被检测到。此外,并非所有的高次谐波都能在噪声之上被检测到每次射击时均测量地板。结果如图 12 所示。

与之前的二极管测量一样,初步最初进行了低空间分辨率扫描。这发生了与图12所示的数据不同,并且似乎与此处显示的高分辨率扫描图存在一些差异,但无法给出明确的结论。由于分辨率低而造成的。如果存在这些差异,它们将表明系统响应发生变化,是由于变量控制不足造成的,这与二极管的其他测试中出现的提示一致。本例中二极管的潜在问题

连接包括二极管的角度误差和位置的变化,因此辐射引起的二极管电缆中的电流。

##### B. 波导

波导对 x 射线的响应测量

光束随位置变化的曲线如图13-15 所示。

2856 MHz 及其整数谐波的强度

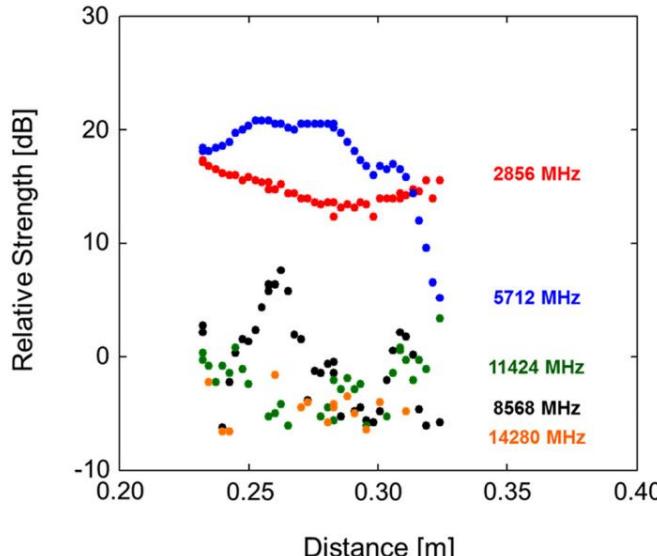


图 12. 用金刚石二极管探测到的 X 射线束信号的前四个谐波的相对强度,作为距离的函数,第二个数据放。

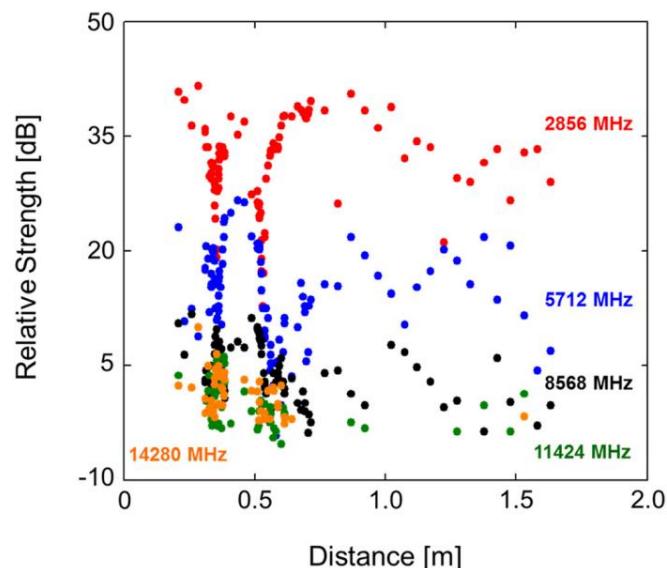


图 13. 利用波导检测到的 X 射线束信号的前五个谐波的相对强度,作为距离的函数。

波导中感应的微波信号如图所示

图13.这些信号明显表现出非常强的零点,因为波导的位置发生改变,发现高度可重复。图14中的上图显示了基本强度与波导位置的关系,为了清晰起见,将其与高次谐波隔离开来,顶部图15中的面板显示了峰值信号强度。后一个图中的噪声水平为 5 mV,或大约图中各个点的大小。

我们再次注意到,由于 X 射线的设计转换器,初级电子被阻止到达波导中产生的微波信号因此是由X射线穿过

波导,在内部产生二次电子  
产生这些微波信号的波导。

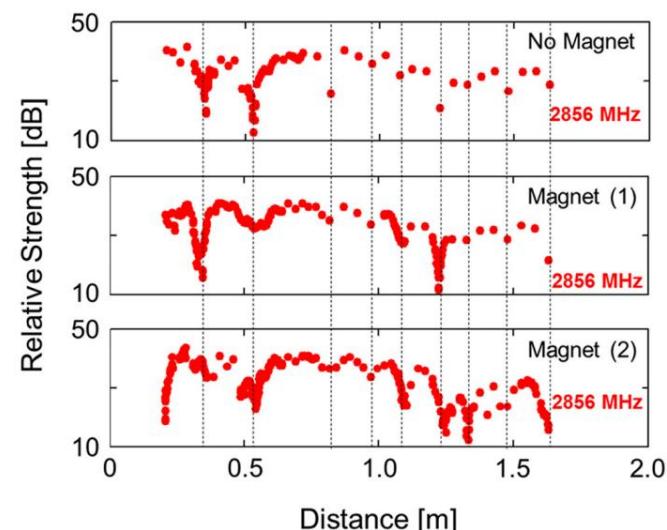


图 14. X 射线束 2856 MHz 谐波的相对强度  
用波导检测到的信号是距离的函数,没有  
磁铁安装完毕(顶部)并且磁铁以两个不同的方向安装(中心、底部)。

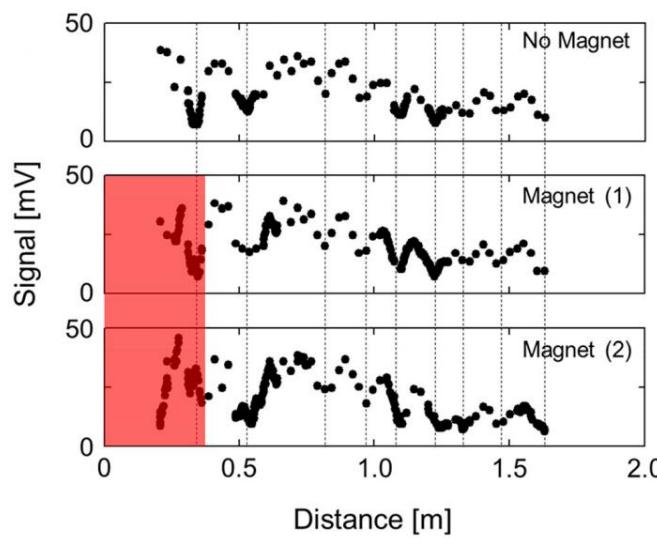


图 15. 使用波导测量的峰峰值信号,安装了 X 射线转换器,作为距离的函数,没有磁铁(顶部),磁铁安装在两个不同的极性(中心,底部)。表示零点存在的垂直线与图 14 中的位置相同,表明总信号中的零点与零点重合

从根本上。

不仅存在 2856 MHz 信号,而且存在更高次谐波,这表明初级电子束中存在的 RF 调制会印刻在 X 射线转换器中产生的 X 射线上,然后印刻在波导中调制的 X 射线产生的二次电子上。这与我们之前在参考文献[22]中的观察结果一致。调制的 X 射线通过 X 射线转换器时,可能还会从 X 射线转换器的下游面释放出 RF 调制的二次电子;这将在下文中详细讨论。

## 五、铝板

还使用未通电二极管作为探测器,用 0.318 cm 至 2.54 cm 之间的铝(以 0.318 cm 为增量变化)代替 X 射线转换器,进行了有限数量的拍摄。这些数据是在两天内收集的。虽然看到了一些信号零点,但第一天基波中这些零点的位置和深度并没有随着铝厚度的变化而发生显着变化。然而,零点的位置和深度在第一天和第二天确实有所不同。两天的测试配置名义上相同,这再次意味着存在细微的变化,很可能与二极管配置有关。第二天只使用了一种厚度的铝,即 0.635 cm,这些结果将在下文讨论。

## VI. 磁场对二次电子的影响

在各种测试配置下观察到的信号中出现零点是意料之外的。一种可能是,当一次电子束通过 Ti 箔束窗或 Al 板时,或当 X 射线通过时,会产生二次电子

通过 Al 板或 X 射线转换器的电子束可能发挥作用。例如,X 射线与腔体和波导的相互作用表明,通过 RF 调制的 X 射线通过产生的二次电子会产生携带相同 RF 调制的二次电子。这些二次电子将以各种速度行进,这些速度都比一次电子或 X 射线慢,导致下游位置的调制彼此同相或异相,并与一次电子或 X 射线的调制同相或异相,从而产生类似干涉的效果。

为了评估这一点,将峰值场强为 0.107 T、横截面积为 2.54 cm<sup>2</sup> 的方形磁体和间隙为 2.54 cm 的磁体放置在铝板和 X 射线转换器的下游,以便偏转任何二次电子(图 2)。图 16 显示了磁场与位置的关系,以磁体的上游面为索引。磁体的上游面与 X 射线转换器或铝板的下游面齐平;在 X 射线转换器就位的情况下,该平面位于参考平面下游 11.7 cm 处。如果磁场  $B_0$  作用于有效长度  $d$ ,则偏转角  $h$  为

$$\sin h^{1/4} B_0 d \propto 1:7.103 b c s p^{-1} \quad (3)$$

其中  $B_0$  的单位为特斯拉米,  $b$  和  $c$  是相对论参数。对于场强 0.1 T、有效距离 2.54 cm, 我们有

$$\sin h^{1/4} 1:47 = \delta b c s p \quad (4)$$

使用辐射传输代码 Monte Carlo N-Particle 版本 6.1.1 (MCNP6) 模拟了 X 射线转换器产生的二次电子。32 在 MCNP6 中模拟了 2856 MHz 线性加速器的测量光束轮廓和 X 射线转换器尺寸。转换器产生的二次电子的能量谱在对数间隔的能量箱结构上进行统计。模拟结果如下

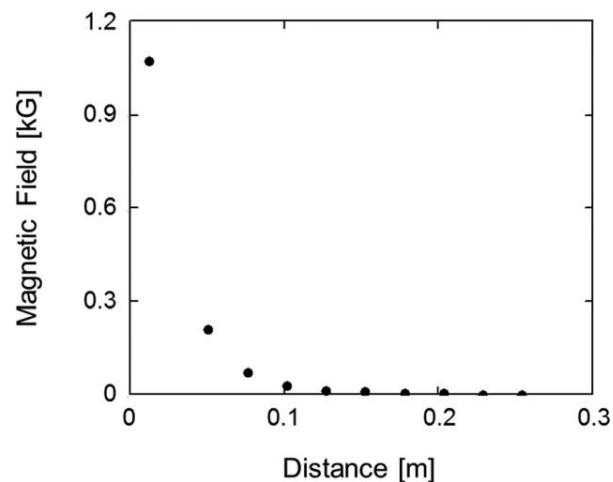


图 16. 磁场与位置的关系,相对于磁铁的上游边缘测量。请注意,这些距离与其他图中使用的距离有偏差。

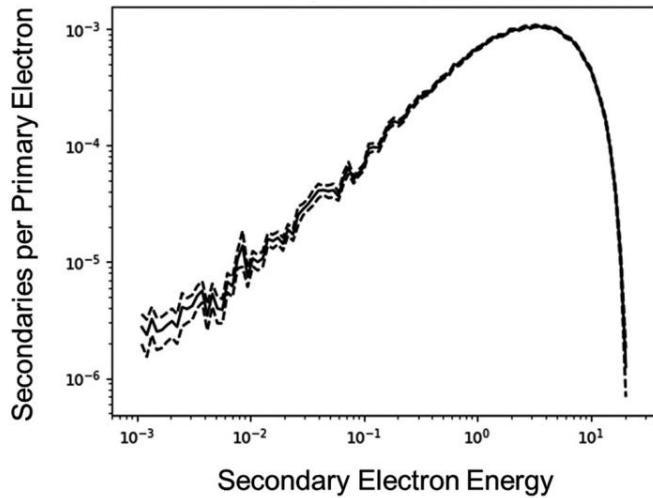


图 17. 使用 MCNP6 模拟的离开 x 射线转换器的二次电子光谱轮廓。

图17显示了每个一次源电子离开转换器的二次电子的分布。实线为统计平均值,虚线显示两个标准差(95%置信度)的统计置信范围。结果表明,峰值二次电子能量约为 3 MeV,根据方程(4),这意味着磁体偏转约 12.5。为了通过实验评估该磁场对系统响应的影响,使用了三种测试配置:(1)带二极管探测器的 X 射线转换器,(2)带二极管探测器的 Al 板堆栈,以及(3)带波导探测器的 X 射线转换器。

## B. 带有二极管探测器的铝板堆栈

图19显示了用二极管检测到的 2856 MHz 基频的相对强度,与二极管位置的关系,其中使用 0.635 厘米的 Al 替代 x 射线转换器,有磁铁和无磁铁。同样,使用单个磁铁方向。两种情况下的结果是

对于大于 32 厘米的距离,磁场基本保持不变;这很好地对应于磁场降至 1 G 的 33 厘米的位置。33在比这更近的距离,磁场会延伸到二极管中,并可能影响二极管内部或外部产生的任何二次电子的轨迹。请注意,由于此处使用的 Al 厚度小于 Al 中 20 MeV 电子的 CSDA 范围(即 3.91 厘米),到达二极管的辐射可能由一次电子和 x 射线组合而成。

## A. 带二极管探测器的X射线转换器

图18显示了有磁铁和没有磁铁时二极管检测到的 2856 MHz 基波和接下来的两个高次谐波随距离的变化情况;没有磁铁时的数据重复自图12。由于二极管尺寸较小且位于标称光束轴上,因此仅使用单一极性的磁场。有磁铁和没有磁铁时的结果基本相同。

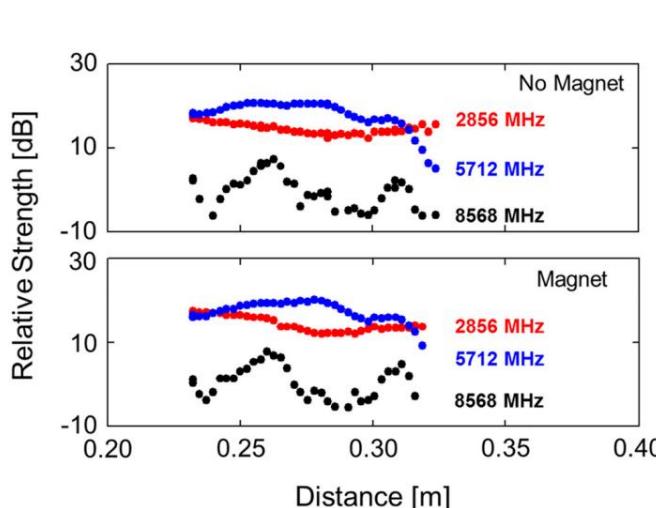


图 18. 使用二极管检测到的 X 射线束信号的前三个谐波的相对强度,作为距离的函数,未安装磁铁(顶部)和安装了磁铁(底部)。

## C. X射线转换器和波导

图14和15显示了安装 X 射线转换器后 2856 MHz 基频和峰峰值信号强度的相对强度与波导位置的关系。每张图都显示了没有磁铁(如前所述)和磁铁处于两种不同方向时的结果;通过翻转磁铁来改变磁场方向,使其质量屏蔽贡献保持不变。由于波导的相互作用区域(由可变光圈定义)与对准激光器的标称光束路径对齐,因此波导的大部分在面向下游时位于标称光束路径的左侧(图2)。因此,如果在 X 射线转换器下游面产生的二次电子影响测量零点的模式,我们也会预计响应不对称,这取决于二次电子是向左偏转还是向右偏转。具体来说,当磁铁将次级线圈向右偏转时,它们只需要偏转几厘米就可以完全避开波导;

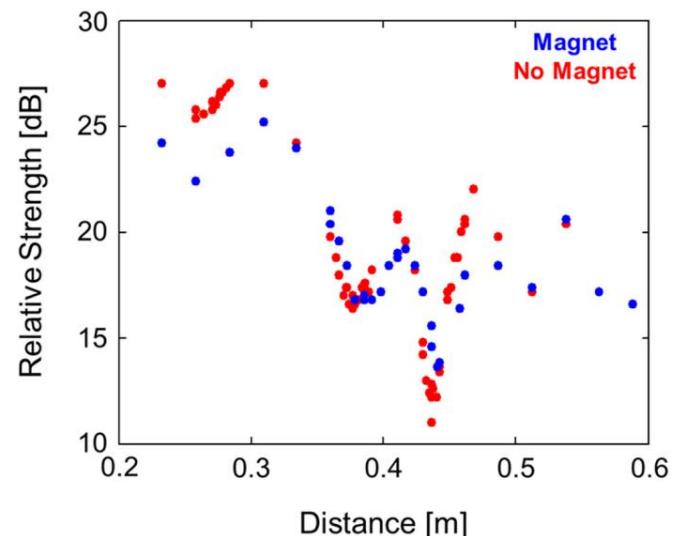


图 19. 使用二极管探测器检测到的 2856 MHz 基频,作为探测器位置的函数,安装 2/800 Al 代替 X 射线转换器,带和不带磁铁。

保守估计为 1.5 厘米,这意味着一旦波导距离 X 射线转换器下游约 23 厘米,或者距离参考平面下游  $z = 34.7$  厘米,X 射线转换器正面的次级线圈就会错过波导。当磁铁将次级线圈向左偏转时,它们必须偏转 36.8 厘米才会错过波导,这会发生在波导距离 X 射线转换器下游约 166 厘米,或者距离参考平面下游  $z = 178$  米的位置,这个距离比本次测试中可用的距离更长。这意味着,如果次级线圈起到了作用,那么在两种场配置下,波导响应的差异应该出现在 34.7 厘米到 178 厘米的区域内。

然而,在距离大于约 37 cm 处,由于磁场的存在或极性,波导响应没有发现显著变化。这些结果与上述结果一样,与假设不一致,即从 X 射线转换器下游面产生的二次电子在确定系统响应方面起任何重要作用。首先,在较长距离处几乎没有变化,此时二次电子通过特定角度的磁偏转应该最有效地防止它们撞击波导。其次,在二次电子向左偏转到波导主体的情况和二次电子向右偏转到波导主体的情况之间没有明显的不对称性。

然而,二次电子在波导内部也发挥着作用,因此我们可能会问,在 37 厘米以内的位置看到的差异是否是由于磁铁穿透波导并改变了轨迹,从而改变了由 X 射线诱导的二次电子产生的微波场。WR 284 波导的内部尺寸约为 72 毫米  $\times$  34 毫米。为了使外部磁场不会显著干扰波导内部由 X 射线产生的二次电子,产生的回旋半径应大于波导尺寸。在施加 1 G 的磁场(大约是地球磁场的两倍)下,任何能量为 4.5 eV 或更高的二次电子都会发生这种情况。

磁铁的磁场在距其上游面下游 25.4 cm 处达到 1 G,即在距参考平面下游  $z \approx 37.1$  cm 处,因此在大于此距离时,我们可以假设磁场对波导内次级的影响可以忽略不计。该区域在图 15 中以红色阴影表示,清楚地涵盖了三种情况之间显著差异的整个区域。因此,波导内 X 射线诱导的次级电子的偏转似乎是图 14 和 15 中不同行为的根源。

最后,请注意,图 14 和 15 中的上部两张图是在同一天拍摄的,而每张图中的下部图是第二天拍摄的。与二极管数据相比,二极管数据似乎显示出零点位置每天都在变化,而这些图中所示的磁影响区域下游的零点看起来非常相似。

## VII. 讨论

这里我们报告了在空气中传播的电子和 X 射线束中 RF 基波和高次谐波的直接测量。还测量了电子和 X 射线通过波导时在波导中产生的信号的 RF 内容。这些信号一定是由波导内部产生的二次电子产生的,对它们的测量支持了我们从文献 [22] 中得出的结论,即一次电子束的 RF 调制被印刻在 X 射线信号上,并且仍然存在于这些 X 射线产生的二次电子中。测量电子束使用了四种技术:无偏金刚石二极管、S 波段腔、B<sub>-</sub> 环和 S 波段波导,而 X 射线束的测量是使用二极管和波导进行的。这些技术的响应不同。B<sub>-</sub> 环可能是电子束频率内容的最佳测量。尤其是靠近光束窗口的地方,光束很小,这是这里使用的唯一非拦截技术,因此可以避免二次电子的形成,而二次电子的形成会使数据解释变得复杂。此外,与腔体和波导不同,它不是谐振的,因此不会用于选择或抑制某些频率。

腔体和波导都表现出一定的频率选择性行为。腔体仅在 2856 MHz 处谐振,对高次谐波的响应要弱得多,腔体和波导中高次谐波的相对强度并没有随着频率的增加而降低,而是显得“无序”。

在整个实验过程中,系统响应中存在局部最小值或零点。在电子束照射下,这些仅发生在用二极管和 B<sub>-</sub> 环测量的高次谐波中,而在 X 射线照射下,金刚石二极管发生了更多变化,并且在波导响应中发生了非常强的准周期零点。

对比使用二极管进行的初步低分辨率测量和最终高分辨率测量,表明系统响应对二极管方向或电缆位置等参数的微小变化很敏感。波导测量中不存在这种日常变化。

零行为,特别是在波导中,暗示存在干涉现象。可以排除 X 射线信号本身的干涉。然而,波导为 X 射线束通过产生的微波信号之间产生干涉引入了几个机会。波导大于 2856 MHz 基波的 10.5 厘米波长。如果调制的 X 射线信号以略微不同的相位到达波导上的不同位置,它将在波导内产生二次电子,这反过来又会产生沿波导双向传播的电磁辐射。其中一个信号将直接传播到波导以同轴过渡,而另一个信号将传播到波导的短路端并反射回过渡,在那里两个信号可以相加或相减。

破坏性地取决于它们的相对相位，反过来，它们又取决于它们产生的位置。因此，波导的辐射提供了分布式源微波，根据不同的阶段产生略有不同的，并产生两个可以重新组合的信号相互干扰。改变波导的位置会改变源项的相对相位。这

可能有助于至少从质量上解释波导。

另一个潜在的因素是来自 X 射线转换器的二次电子的产生。这些电子将通过 X 射线的射频调制产生，但会传播得更慢，导致他们的贡献探测器响应会随着位置而周期性变化。然而，我们可以排除对通过使用磁铁来偏转这些次级的影响远离标称光束路径。该磁铁的存在对系统频率响应没有显著影响

在长距离，其中次级的移除应该是最有效的。唯一显著的变化当探测器距离磁铁太近时磁场渗透到它们里面。这种变化在波导测量中尤为明显，表明

磁铁改变了轨迹，因此微波产生，产生二次电子通过 X 射线信号进入波导内部。

致谢

作者衷心感谢由爱达荷加速器中心的团队提供，尤其是 J. Stoner、C. O' Neill 和 K. Folkman，这项工作是不可能完成的。

<sup>1</sup> JR Harris 和 PG O Shea, *IEEE 电子器件汇刊* 53, 2824-2829 (2006年)。

<sup>2</sup> JG Neumann, JR Harris, B. Quinn 和 PG O Shea, *《Rev. Sci.》。乐器。* 76,033303 (2005)。

<sup>3</sup> KR Spangenberg, 《真空间管》(麦格劳·希尔,纽约,1948年)。

<sup>4</sup> CA Spindt, CE Holland, A. Rosengreen 和 I. Brodie, *IEEE Trans. 电子设备* 38, 2355 (1991)。

<sup>5</sup> A. Pedersen, A. Manolescu 和 A. Valfells, *Phys. 牧师莱特。* 104,175002 (2010)。

<sup>6</sup> KL Jensen, DA Shiffler, IM Rittersdorf, JL Lebowitz, JR Harris, YY Lau, JJ Petillo, W. Tang 和 JW Luginsland, *J. Appl. 物理。* 117, 194902 (2015年)。

<sup>7</sup> M. Reiser, 《带电粒子束的理论与设计》(Wiley,新约克,1994年)。

<sup>8</sup> RB Miller, 《强带电粒子物理学导论》

Beams (Plenum Press,纽约,1982年)。<sup>9</sup>

PG O Shea, RA Kishik, M. Reiser, B. Beaudoin, S. Bernal, Y. Cui, A.

Diep, D. Feldman, M. Glanzer, TF Godlove, I. Haber, J. Harris, H. Li, J.

Neumann, B. Quinn, M. Qurius, M. Snowel, A. Valfells, M. Virgo, M.

Walter, R. Yun 和 Y. Zou, 《激光部分》(梁修订版20,599 (2002))。

10S. Bernal, B. Beaudoin, Y. Cui, M. Glanzer, TF Godlove, J. Harris, M.

Holloway, I. Haber, RA Kishik, W.-T. Lee, H. Li, D. Lamb, B. Quinn,

M. Qurius, M. Reiser, A. Valfells, M. Walter, M. Wilson, R. Yun, Y. Zou,

和 PG O Shea, *Nucl. 乐器。方法物理。现实。从* 519, 380-387 (2004)。

11A. Faltens, EP Lee 和 SS Rosenblum, *J. Appl. Phys.* 61, 5219 (1987)。

12J. R. Harris, JG Neumann, K. Tian 和 PG O Shea, *Phys. Rev. E* 76, 026402 (2007年)。

13J. R. Harris 和 PG O Shea, *物理等离子体* 15,123106 (2008)。

14J. R. Harris 和 JW Lewellen, *J. Appl. Phys.* 108,083301 (2010)。

15B. R. Poole 和 JR Harris, *物理等离子体* 20,043108 (2013)。

16A. Gover, *物理评论规范顶部加速梁* 8,030701 (2005)。

17Y. C. Mo, RA Kishik, D. Feldman, I. Haber, B. Beaudoin, PG O Shea, 和 JCT Thangaraj, *物理学。莱特牧师。* 110,084802 (2013年)。

18B. R. Poole, DT Blackfield, Y.-J. Chen, JR Harris 和 PG

O Shea, 《不匹配光束中的空间电荷波》，《

2009 年粒子加速器会议,加拿大温哥华,4-8

2009 年 5 月。

19J. R. Harris, JW Lewellen 和 BR Poole, *J. Appl. Phys.* 114,063304 (2013)。

20J. R. Harris, JW Lewellen 和 BR Poole, *J. Appl. Phys.* 116,133302 (2014)。

21J. R. Harris, BR Poole 和 JW Lewellen, *J. Appl. Phys.* 122,093302 (2017)。

22J. R. Harris 和 RB Miller, *J. Appl. Phys.* 123, 083302 (2018年)。

23R. B. Miller, 美国专利 5,608,403 (1997 年 3 月 4 日)。

24K. C. Gendreau, Z. Arzoumanian, SJ Kenyon 和 NS Spartana (美国) 专利 9,117,622 (2015 年 8 月 25 日)。

25J. Mitchell, “脉冲星导航和 X 射线通信演示

在第一届国际空间站研发大会上，

科罗拉多州丹佛市,2012 年 6 月 25 日至 28 日。

26L. MB Winternitz, KC Gendreau, MA Hassouneh, JW Mitchell, WH Fong, W.-T. Lee, F. Gavrill 和 Z. Arzoumanian, 《X 射线在未来太空导航和通信中的作用》，第 36 届 AAS 年会

制导与控制会议,科罗拉多州布雷肯里奇,2013 年 2 月 1 日至 6 日。

27S. Li-zhi, Z. Bao-sheng 和 L. Yong-an, “X 射线/EUV 光学领域的进展和组件 IX,” *Proc. SPIE* 9207, 920716 (2014年)。

28H. Li, X. Tang, S. Hang, Y. Liu 和 D. Chen, *J. Appl. Phys.* 121,123101 (2017)。

29S. Shi-Bin, X. Lu-Ping, Z. Hua 和 G. Na, *Chin. 物理。乙* 24,094215 (2015)。

30 参见 [iac.isu.edu](http://iac.isu.edu) 了解有关爱达荷加速器中心的更多信息。

31 请参阅 <http://www.aasc.net/products/diamond-radiation-detectors> 更多该产品的信息。

32T. Goorley, “MCNP6.1.1-Beta 发行说明”, 报告编号 LA-UR-14-24680, 2014 年。

33 图 16 显示了相对于磁铁的上游面。在这些测试中，磁铁的上游面位于用于其他距离的参考位置下游 7.62 厘米处  
本文中的测量