

ZnS(Ag)闪烁体对 EAST 中快电子响应的模拟分析

王克文^{1,2} 黄娟¹ 常加峰¹ 周瑞杰¹

1(中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所 合肥 230026)

2(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 在托卡马克中,快电子一旦脱离托卡马克磁场约束而损失在真空壁或者限制器上,可能会产生大量杂质,影响装置正常运行,甚至会造成装置的损坏。为了研究快电子的损失行为,在先进实验超导托卡马克(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)上,使用基于 ZnS(Ag)闪烁体探头的诊断系统对快电子损失进行探测。为了理解其损失特性,使用 Geant4 模拟程序模拟了不同初始状态的电子与诊断系统闪烁体探头的相互作用,获得了闪烁体发光强度与入射电子初始状态的曲线关系。模拟结果表明:次级电子与初始电子使闪烁体发光的贡献占据不同的主导能量区间;发光强度随入射电子能量增大而先增大后减小,峰值在 12 MeV 附近,且斜入射时发光光子数大于垂直入射,而闪烁体的厚度对峰值位置无明显影响。加入磁场后,磁场角度、电子俯仰角都会对发光强度有明显影响。这些结果有助于理解 EAST 实验中闪烁体探头上探测到的快电子损失信号,为进一步研究快电子损失提供基础。

关键词 托卡马克, 闪烁体, Geant4, 快电子

中图分类号 TL631.2⁴

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.050003

Simulation analysis of fast electron response of ZnS(Ag) scintillator in EAST

WANG Kewen^{1,2} HUANG Juan¹ CHANG Jiafeng¹ ZHOU Ruijie¹

1(Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physics Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China)

2(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract [Background] In a tokamak, when fast electrons are deconfined by the tokamak magnetic field constraint and lost to the vacuum wall or limiter, the device may become damaged and the discharge may be affected. [Purpose] This study aims to explore the loss behavior of fast electrons during discharge using a diagnostic system based on a ZnS(Ag) scintillator probe for detecting the loss of fast electrons on the Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST). [Methods] The Geant4 simulation program was employed to simulate the interaction between electrons in different initial states and the scintillator probe of the diagnostic system. Firstly, the probe model and the filling material model of stainless steel and ZnS(Ag) coating were established in Geant4. Then, the interaction between electron beam and scintillator probe under different incident conditions (incident energy, angle, scintillator thickness, magnetic field size, etc.) were simulated, and the physical processes were recorded.

国家重点研发(No.2019YFE03020004)、国家自然科学基金(No.11975276)资助

第一作者: 王克文, 男, 1998 年出生, 2020 年毕业于南华大学, 硕士研究生, 研究领域为磁约束聚变等离子体

通信作者: 黄娟, E-mail: juan.huang@ipp.ac.cn; 常加峰, E-mail: changjiaf@ipp.ac.cn

收稿日期: 2023-12-05, 修回日期: 2024-01-05

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2019YFE03020004), National Natural Science Foundation of China (No.11975276)

First author: WANG Kewen, male, born in 1998, graduated from University of South China in 2020, master student, focusing on magnetic confinement fusion plasma

Corresponding author: HUANG Juan, E-mail: juan.huang@ipp.ac.cn; CHANG Jiafeng, E-mail: changjiaf@ipp.ac.cn

Received date: 2023-12-05, revised date: 2024-01-05

Finally, the recorded data were accessed by MATLAB programming for analysis. **[Results]** The results show that the contribution of secondary electrons and initial electrons to the luminescence intensity of scintillators occupies different dominant energy ranges. The luminescence intensity first increases and then decreases with the increase of incident electron energy, with a peak value around 12 MeV, and the number of emitted photons at oblique incidence is greater than that at vertical incidence. When the electron energy is lower than 4.3 MeV, secondary particles dominate the scintillation, and when the electron energy is higher than 4.3 MeV, primary particles dominate. The thickness of the scintillator has no significant effect on the peak position. After, the luminous intensity is considerably affected by the magnetic field angle and electron pitch angle after adding a magnetic field. **[Conclusions]** The results of this study contribute to the understanding of the fast electron loss signal detected by the scintillator probe in the EAST experiments, providing a basis for further study of fast electron loss.

Key words Tokamak, Scintillator, Geant4, Fast electron

托卡马克(Tokamak)是一种利用磁约束来实现受控核聚变的环形容器。托卡马克中,等离子体被磁场约束在环形的真空室内。该装置的设计目标是通过维持稳定的等离子体状态,在可控的环境中实现核聚变反应,解决人类能源需求^[1]。为了满足聚变条件,托卡马克中的等离子体需要被持续加热。在加热过程中,等离子体中的电子能量不断提高。进入速度空间逃逸区的电子称为逃逸电子(Runaway Electron, RE)^[2]。逃逸电子的能量能达到很高的量级,在FTU(Frascati Tokamak Upgrade)上使用电子回旋(Electron Cyclotron, EC)加热,RE能量达到了15 MeV^[3]。RE由于能量高,一旦脱离磁场约束损失在真空壁上,会损害装置,产生的杂质会影响放电正常进行^[4]。为了研究逃逸电子损失的特性,许多装置上都发展了各种研究逃逸电子损失的诊断系统,最终为缓解或者抑制逃逸电子提供基础信息。在COMPASS(COMPAct ASSEMBly)^[5]与FTU上配备了探针式的切伦科夫诊断^[6],可以获得具体局域位置处的逃逸电子损失信息,与本文要介绍的诊断系统有相似之处。其他诊断方式例如ASDEX Upgrade(AUG)上的同步辐射诊断^[7],KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)上的红外图像诊断^[8]等,这些诊断方式可以提供逃逸电子的能量、空间分布、损失通量信息等。

先进实验超导托卡马克装置(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)装置是中国研究人员在国际合作的基础上开发的一种重要的托卡马克装置。EAST的设计目标是实现长脉冲、稳态运行的等离子体,并研究解决与核聚变相关的物理和工程难题^[9]。作为先进的大型托卡马克,EAST装置上有如电子回旋加热、离子回旋加热等多种辅助加热手段^[10]。在EAST装置的运行过程中逃逸电子的产生也是不可避免的,其能量可以达到25 MeV^[10]。EAST上也发展了一些对逃逸电子的诊

断系统,如电子回旋辐射(Electron Cyclotron Emission, ECE)、逃逸电子诊断(Runaway electron diagnostic system, RA)^[11],硬X射线诊断(Hard X-ray Radiation, HXR)^[12]等。

在EAST装置上,建立了一套基于闪烁体探头的快离子损失诊断系统(Fast Ion Loss Detect system, FILD),能够探测到损失到探头上的逃逸电子与快电子。

几何追踪程序4(Geometry and Tracking 4, GEANT4)是欧洲核子研究组织(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN)开发的一款开源、高性能的粒子传输和相互作用模拟工具,在粒子物理、核物理、加速器设计、空间工程和医学物理等领域有着广泛的应用^[13]。为了研究入射电子与闪烁体探头发光强度的关系,本文使用Geant4程序包模拟了不同入射条件下(入射能量、角度、闪烁体厚度、磁场大小等),电子束与闪烁体探头的相互作用。

需要特别说明的是,逃逸电子除了能量较高,还需要满足如强电场、低电子密度等条件^[2],而下文的模拟不涉及这些条件,只将电子能量提升到快电子能段。为了避免混淆,模拟中的电子称为快电子而非逃逸电子。

1 实验与模拟设置

1.1 FILD系统与闪烁体探头

往复式FILD安装在EAST的J窗口外部的中平面上方。FILD诊断由探头、交换箱、分光器、数据检测与采集系统和长轴组成。探头通过J窗口插入到最外闭合磁面外的位置,可以沿径向移动(精度为1 mm),以便根据实际需求调整位置^[14],诊断系统分布图如图1所示,闪烁体的发光图像经过主光路Optical I后,由分光器Optical splitter分出两束光,分别由Optical II进入到电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机,以及由Optical III进入

到光电倍增管(Photo-Multiplier Tubes, PMT)。厚度为 3 mm 的 316L 不锈钢屏蔽层可以保护闪烁体, 不锈钢密度为 $7.98 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 主要成分定义如表 1 所示, 其中微量元素如硅、碳、硫等忽略不计。4 cm×4 cm×50 μm 的 ZnS(Ag)闪烁体涂层涂抹在不锈钢屏蔽层背板, 可以通过 CCD 相机直接地看到闪烁体的发光图像^[15]。

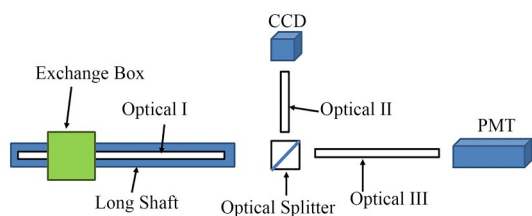


图1 FILD系统布局图
Fig.1 Diagram of FILD system layout

图2为闪烁体探头的细节图, 其中高能电子直接轰击不锈钢背板, 使闪烁体发光。图中表明了离子与电子轰击闪烁体探头的不同轨迹。其中, 高能电子由于质量小且能量高, 几乎沿磁力线径直地轰击不锈钢背板再使闪烁体发光, 而离子则回旋运动到准直器开孔处, 再轰击闪烁体使闪烁体屏幕发光。电子入射不锈钢造成的闪烁体发光有两种来源: 第一种来源于入射电子与不锈钢背板相互作用产生的次级粒子, 这些次级粒子为正负电子以及 γ 光子, 次级粒子穿过不锈钢后使闪烁体发光; 第二种来源于能量较高的电子, 在与不锈钢作用并且损失部分能量后仍能够穿过不锈钢, 再与闪烁体作用并发光^[16]。图3(a)为EAST实验中, 第113 598次放电时, 通过CCD相机观察到的快电子使闪烁体发光的亮度变化, 其中红框为CCD相机视野范围, 蓝色框为闪烁体屏幕边界; 图3(b)为2~5 s内等离子体电流(I_p)、电子密度(N_e)、顶部第一个共振磁扰动(Resonant Magnetic Perturbation, RMP)线圈电流IU1、FILD第一道PMT信号FILD01、快中子波动(Neutron Fluctuation, NF)信号NF3以及逃逸电子诊断信号RA1的变化。RMP线圈电流经历了3~3.5 s的爬升, 在接近3.4 s时, 由于RMP线圈电流诱导的磁岛渗透入等离子体内部, 造成了快电子的径向逃逸损失, NF3、RA1、FILD01信号的突起反映了这一损失行为; 图3(c)为113 598次放电2~5 s内的快电子损失逃逸的能量计数, 计数表明此时间段内快电子损失逃逸的能量主要分布在0~3 MeV。

1.2 Geant4代码

在Geant4中, 按照研究目的, 对代码进行如下思路的设置: 先设置好不锈钢以及闪烁体, 然后定义

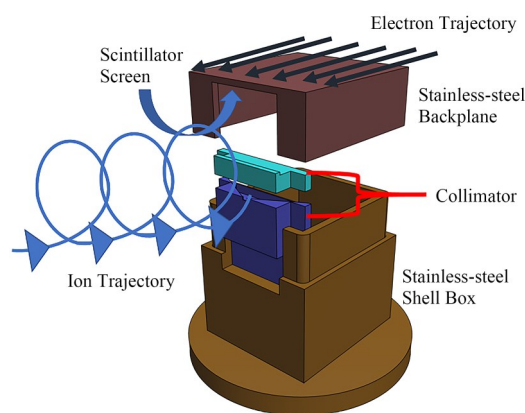


图2 闪烁体探头
Fig.2 Diagram of scintillator probe

好电子源类型; 之后根据现实中的需要选择并注册合适的物理过程, 最后编写接口调用数据。

1.2.1 定义几何结构与材料属性

在本次模拟中, 不锈钢设置成3 mm厚的薄片, ZnS(Ag)闪烁体紧贴不锈钢表面, 其厚度可以更改, 二者的长宽根据真实尺寸, 设置为4 cm×4 cm。

不锈钢的材料属性在Geant4中采取混合物方式, 将表1的各元素的质量分数添加入材料中。

表1 316L不锈钢成分
Table 1 Components of 316L stainless steel

元素 Elements	质量分数 Mass fraction
铁 Iron	69%
铬 Chromium	16%
镍 Nickel	11%
锰 Manganese	2%
钼 Molybdenum	2%

ZnS(A)闪烁体密度为 $4.09 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 厚度默认为50 μm 。在Geant4中, 对于闪烁体材料需要额外定义光学属性。折射率与反射率参考已有数据^[17], 光产额取50 000 MeV⁻¹, 发光能谱为典型的450 nm峰值谱, 衰减时间常数为70 ns, 银掺杂浓度设置为10%。这里不考虑不锈钢与闪烁体界面的光学反射。

定义完成的模型在Geant4中的可视化如图4, 展示了涂抹于不锈钢平板后的ZnS(Ag)涂层。

1.2.2 定义粒子源

为了便于运行, 以及尽量使不锈钢能全部接受到入射电子, 电子源采取点源形式, 每次入射单能电子, 将电子源的位置设置在距离不锈钢足够近的地方, 同时编写接口, 使得能够调整入射电子的能量, 入射角度与俯仰角(pitch angle)。

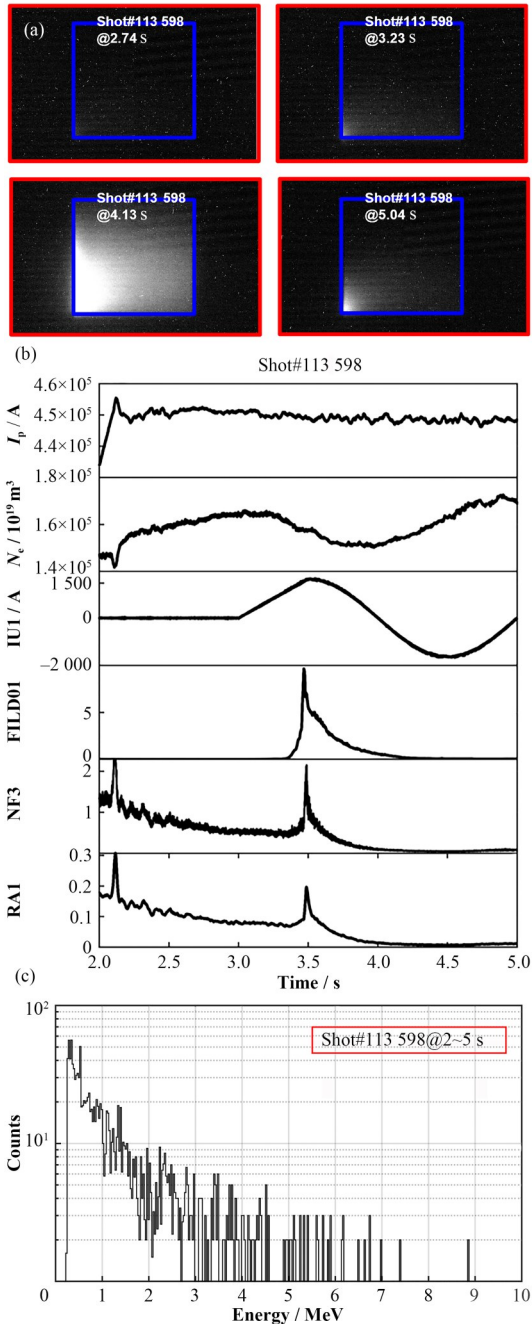


图3 (a) 113 598 炮, CCD 相机看到的闪烁体发光图像亮度变化; (b) 113 598 炮 2~5 s 内 I_p 、 N_e 、IU1、FILD01、NF3 以及 RA1 的变化; (c) 113 598 炮 2~5 s 内损失逃逸电子的能量计数

Fig.3 (a) Change in brightness of the scintillator luminescence image captured using the CCD camera of shot 113 598; (b) Changes in I_p , N_e , IU1, FILD01, NF3, and RA1 in 2~5 s of shot 113 598; (c) Energy count of lost runaway electrons in 2~5 s of shot 113 598

1.2.3 定义物理过程

官方的 QBBC 物理列表, 能够满足所模拟能量范围的电子与不锈钢相互作用的需要。而闪烁体发光的物理过程需要额外注册到物理过程列表中, 在 Geant4 中光子的发射过程, 通常是由入射粒子产生的光子, 如荷电粒子的能量损失或正电子湮灭产生

的光子。考虑到真实情况下, 闪烁体的发光来源有正负电子、 γ 光子等, 使用官方的 G4OpticalPhysics 过程可以满足需要。由于还可能加入磁场, 因此还需要将电磁相互作用注册到列表中, 由于本次模拟只考虑简单的均匀磁场, 采用 G4EmStandardPhysics 即可。

1.2.4 输出数据

本次模拟中, 自定义了光子计数器以收集闪烁体中的发光光子, 并且编写接口将所需要的信息, 如入射电子能量、pitch 角、磁场大小、磁场角度、闪烁体厚度、产生光子数等, 输入到 .txt 文件中, 最后使用 MATLAB 处理数据。

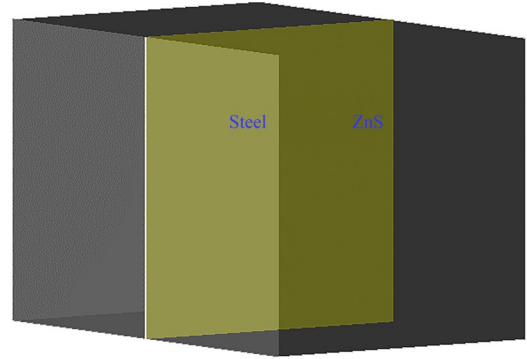


图4 Geant4 中的不锈钢与 ZnS(Ag) 涂层模型
Fig.4 Model of stainless steel and ZnS(Ag) coating established in Geant4

2 数据分析

2.1 电子入射时闪烁体发光的机制分析

为了研究电子使闪烁体发光的两种方式的 basic 机制的能量范围, 模拟了设置在无磁场环境中每次固定发射 2 000 个电子垂直入射到不锈钢表面后闪烁体的发光情况。在托卡马克环境中, 损失到边界的逃逸电子的能量可以达到 18 MeV^[18], 为了尽可能地涵盖闪烁体探头能够接收到的电子的能量, 将能量范围从 0 MeV 调节到 25 MeV, 如图 5 所示。图 5 表明当电子能量在 4~12 MeV 时, 发光光子数与电子能量有近似线性的关系, 在 12 MeV 处达到顶峰。能量大于 12 MeV 时, 发光光子数随着能量增加开始略微降低, 进入平台。

值得注意的是, 将小于 4 MeV 数据段放大, 并且把坐标轴转变成对数坐标, 如图 6 所示, 可以看出当入射电子能量提高到约 0.7 MeV 时, 发光光子数有一个明显的抬升。

为了解释图 5 曲线后半段近似平台的原因, 本文进行了进一步的模拟。首先, 将闪烁体前的不锈

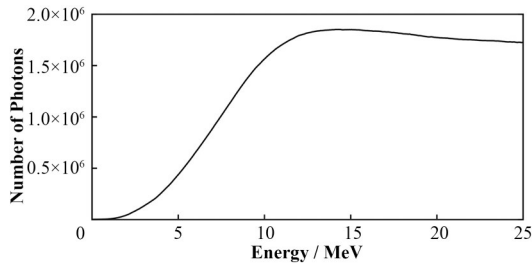


图5 无磁场,垂直入射下,入射电子能量与闪烁体发光光子数关系

Fig.5 Relationship between incident electron energy and number of luminescent photons of the scintillator without a magnetic field under vertical incidence

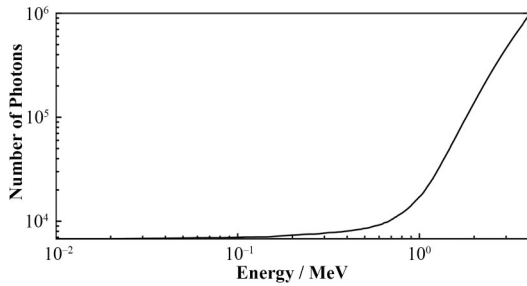


图6 0~4 MeV的对数坐标轴

Fig.6 Logarithmic coordinate axis of 0~4 MeV

钢注释掉,使电子直接入射到闪烁体上,获得的闪烁体对单能电子的响应随入射电子能量的曲线关系如图7所示。可以明显看出,ZnS(Ag)闪烁体对不同能量的电子的响应可以分为两个部分:低于1 MeV的电子与高于1 MeV的电子。其中高于1 MeV的电子的响应不随电子能量而变化,低于1 MeV的电子的响应可以近似为高于1 MeV的电子的三倍。再将闪烁体注释掉,只保留不锈钢,统计穿过不锈钢的所有电子(包括初级与次级)的计数与能量。由于ZnS(Ag)闪烁体对于 γ 的响应很低^[19],这里不考虑 γ 光子对Zn(Ag)闪烁体的响应将低于1 MeV的电子乘以3的权重因子,高于1 MeV的电子乘以1的权重因子,得到了图8所示曲线,其中横坐标为入射电子能量,纵坐标为在各个能量下,将穿过不锈钢的所有电子的能量分为低于以及高于1 MeV的两个区间,每个区间分别乘以上述的权重因子后的预想发光情况。可以看到图8与图5符合很好这样就定性地解释了图5后半段,入射电子能量提高,发光光子数没有提高的原因:一方面是闪烁体对不同能量电子的响应,如图7所示;另一方面是一定能量的电子穿过不锈钢后,能量会由单能变为一定的能量分布。

实际上,一定能量的电子入射不锈钢后,闪烁体接受到的粒子总是由两部分构成:一部分是穿透不锈钢的电子,这部分电子损失了一定的能量;另一部

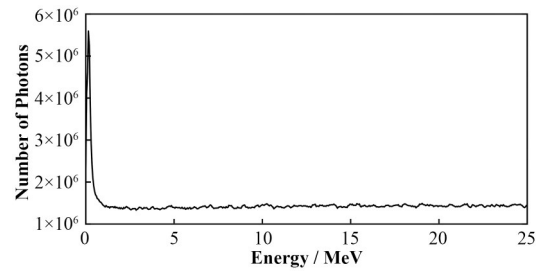


图7 闪烁体对电子的能量响应曲线

Fig.7 Energy response curve of the scintillator to electrons

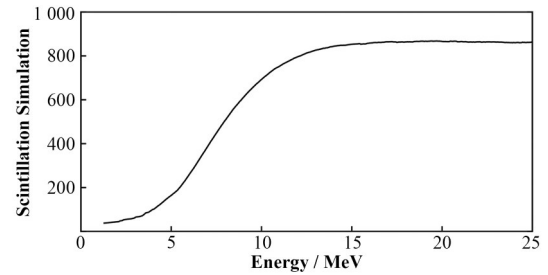


图8 将穿过不锈钢的电子分为两个能段后,根据图6乘上不同权重后的模拟发光曲线

Fig.8 Simulated luminescence curves of electrons divided into two energy segments, after passing through the stainless steel, multiplied by different weights according to Fig.6

分则是初始电子与不锈钢相互作用产生的正负电子、 γ 光子,为次级粒子。这两部分粒子都会使得闪烁体发光,其中次级粒子使得闪烁体发光占闪烁体发光总数比例随入射电子能量变化的曲线如图9所示,闪烁体厚度为默认设置的50 μm 。图9中可以看出,次级粒子导致发光在入射电子能量低于3 MeV时占绝对主导,闪烁体发光几乎全部由次级粒子的贡献构成。入射电子能量大于3 MeV时,这部分比例开始下降,在4.3 MeV时,初始粒子和次级粒子的贡献相同;一直到约7 MeV时,次级粒子发光占比达到最低,约为0.04,之后缓慢上升到0.09。这样,电子入射不锈钢使闪烁体发光的两种机制的能量区间就能够得到区分:第一种机制,也就是较低能的电子产生的次级粒子的贡献占主导时,入射电子能量小于4.3 MeV;当入射电子能量大于4.3 MeV后,第二种机制的较高能的穿过不锈钢的电子的贡献开始占主导。

图10是垂直入射下,发光光子数与闪烁体涂层厚度的关系。可以看出,ZnS(Ag)闪烁体厚度对入射电子的发光强度会有明显影响,增加或减小ZnS(Ag)闪烁体厚度会分别增强或减弱入射电子的发光,且高能电子对闪烁体厚度的变化更敏感。

不同能量下,入射角度对发光的影响如图11所示,其中闪烁体厚度为50 μm 。从图11可以看出,随着能量增加,发光峰值角度逐渐向斜入射角度靠近。

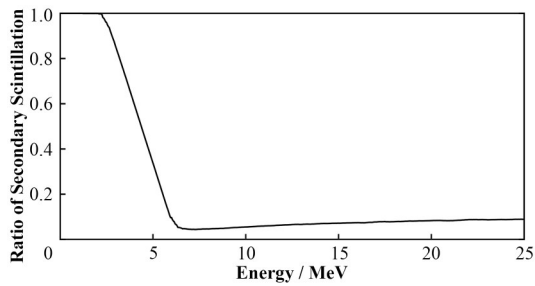


图9 次级粒子发光占比随入射电子能量的关系
Fig.9 Relationship between scintillation proportion of secondary particles and incident electron energy

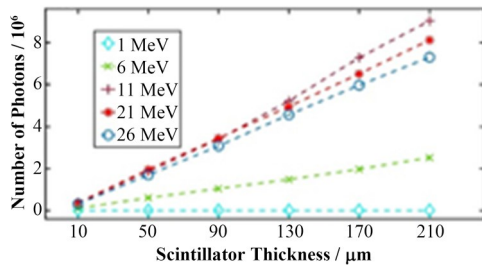


图10 改变ZnS(Ag)涂层厚度对发光的影响
Fig.10 Effect of thickness of ZnS(Ag) coating on luminescence under vertical incidence

经过简单的分析可以得出发光曲线的最大角度没有出现在垂直入射的角度的原因:当电子入射不锈钢的角度为斜入射时,电子在不锈钢中的经历的径迹长度会比垂直入射长,这样就增加了电子与物质作用的概率,会有更多次级粒子如正负电子、 γ 光子被释放,这些次级粒子进入到闪烁体中与闪烁体作用,从而有更多的光子被激发。

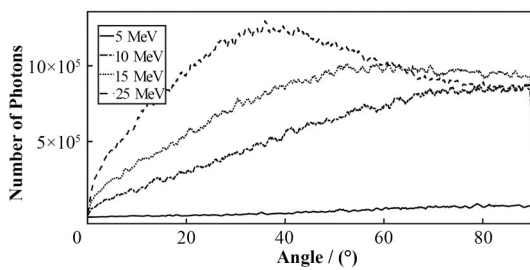


图11 不同入射能量,发光光子数随入射角度的变化
Fig.11 Variation in number of luminescent photons with incident angle at different incident energies

2.2 加入磁场后的发光情况

磁场对电子的影响主要为使电子做拉莫尔回旋运动,进而改变了电子入射不锈钢时的角度。模拟中限制磁场存在的区域为不锈钢板前,在不锈钢、闪烁体内部以及闪烁体后都没有磁场。

图12为电子在不同的磁场值下,发光光子数与入射能量的关系,磁场与不锈钢夹角为 10° 。EAST

中逃逸电子的俯仰角度在 10° 左右^[20],因此设置电子俯仰角为 10° 。可以直观地看出来,加入磁场后,发光曲线对能量的依赖与无磁场时的图5有很大不同。加入磁场后,在5 MeV处才开始有明显抬升,且在这之后有近似线性的增长;其次,在一定的范围内改变磁场值不会对结果有太大影响。这种线性的增长原因是因为磁场带来的回旋运动一定程度上随机化了入射角度的分布,从而导致当能量增加时,发光光子数平稳地上升。

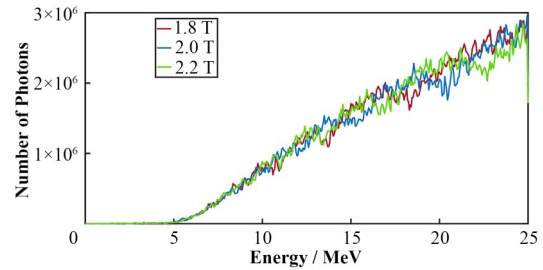


图12 不同磁场值下发光光子数量对入射能量的曲线关系
(彩图见网络版)

Fig.12 Relationship between number of scintillation photons and incident energy at different magnetic field values (color online)

改变磁场角度(默认俯仰角为 10°)以及电子俯仰角(默认磁场夹角为 10°)的影响分别如图13以及图14所示,电子能量为12 MeV。图中可以看出,当增大磁场与不锈钢角度以及电子俯仰角时,同能量下发光光子数会有少量增加。这是因为,如图11所示的峰值一样,峰值入射角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 中间角度,增加磁场与不锈钢夹角以及增加俯仰角都会使电子的入射角向这个区间靠近,因此也就增加了发光光子数量。

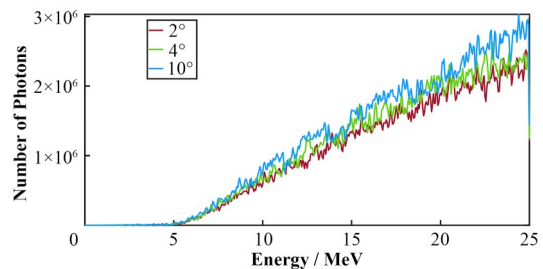


图13 不同磁场夹角下发光光子数量对入射能量的曲线关系
(彩图见网络版)

Fig.13 Relationship between number of scintillation photons and incident energy at different magnetic field angles (color online)

对俯仰角的关系如图15所示。图15扫描了4个入射能量,磁场夹角为 10° 。图15中可以看出,较低能的5 MeV的电子对俯仰角的变化不敏感。较高能的三个能量的电子,其发光光子数量都随着俯

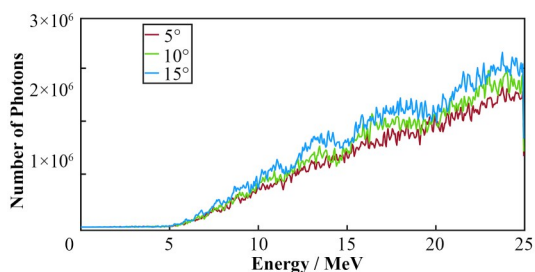


图 14 不同俯仰角下发光光子数量对入射能量的曲线关系 (彩图见网络版)

Fig.14 Relationship between number of scintillation photons and incident energy at different pitch angles (color online)

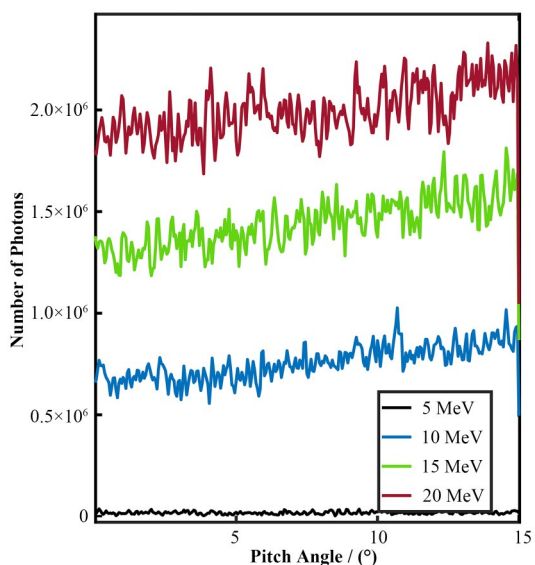


图 15 不同入射能量下,发光光子数与俯仰角的关系 (彩图见网络版)

Fig.15 Relationship between number of photons and pitch angle for different incident energies (color online)

仰角变大而有可辨别地增加。

3 结语

在托卡马克中,逃逸电子和快电子的损失会造成严重后果。在 EAST 装置上配置了一套基于 ZnS(Ag)闪烁体的快离子损失诊断系统,兼顾对逃逸电子和快电子损失的诊断功能。本文使用 Geant4 程序对诊断探头进行建模,模拟了不同入射条件下电子对 ZnS(Ag)闪烁体发光的影响。结果表明,闪烁体发光光子数与入射能量,入射角度以及磁场等条件有关。首先,发光光子数随入射能量增加而先增加后减小,在 12 MeV 处有峰值,发光光子数在 500~700 keV 处有显著增长。得到了电子入射不锈钢使闪烁体发光的两种机制的能量区间:入射电子能量小于 4.3 MeV 时,初始电子与不锈钢作用产生的次级电子占发光的主要贡献;当入射电子能量大于

4.3 MeV 后,穿过不锈钢的初始电子的发光贡献占主导。其次,同样能量的电子,发光光子数的最大值不在垂直入射,而是在斜入射;增加电子能量,峰值角度会向更平行于不锈钢的方向倾斜。不同闪烁体厚度下,入射电子发光光子数会有明显区别。

当加入磁场后,由于磁场会使电子做螺旋运动从而改变电子入射的角度,从而对发光产生了影响。在默认设置的磁场与不锈钢夹角为 10°,电子俯仰角为 10°的条件下,扫描磁场值 1.8 T、2.0 T、2.2 T,磁场值的改变对发光光子数量与能量的曲线无明显改变。小角度的磁场夹角与电子俯仰角的增加,均使发光光子数量与能量的曲线抬升。较低的 5 MeV 能量下,发光光子数对 0°~15°的俯仰角无明显依赖,而较高能的 10 MeV、15 MeV、20 MeV 下增加俯仰角会增加发光光子数量。

本文所作出的模拟并未考虑真实的电子损失轨迹,且为相对定性的分析。所得出的结论能够支持对实验中逃逸电子与快电子损失对闪烁体探头的影响做出初步的分析,以便于进一步的损失特性的理解。

作者贡献说明 本文大部分工作由王克文独立完成;黄娟、常加峰对本文文字以及分析过程提供了修改意见;周瑞杰老师在 Geant4 的程序问题上提供了帮助,以及对文章中的细节问题提出了宝贵建议。

参考文献

- 1 Artsimovich L A. Tokamak devices[J]. Nuclear Fusion, 1972, **12**(2): 215 - 252. DOI: 10.1088/0029-5515/12/2/012.
- 2 Breizman B N, Aleynikov P, Hollmann E M, *et al.* Physics of runaway electrons in tokamaks[J]. Nuclear Fusion, 2019, **59**(8): 083001. DOI: 10.1088/1741-4326/ab1822.
- 3 Martín-Solis J R, Esposito B, Sánchez R, *et al.* Comparison of runaway dynamics in LH and ECRH heated discharges in the Frascati Tokamak Upgrade[J]. Nuclear Fusion, 2005, **45**(12): 1524 - 1533. DOI: 10.1088/0029-5515/45/12/007.
- 4 Bolt H, Miyahara A, Miyake M, *et al.* Simulation of tokamak runaway-electron events[J]. Journal of Nuclear Materials, 1987, **151**(1): 48 - 54. DOI: 10.1016/0022-3115(87)90054-7.
- 5 Kwiatkowski R, Rabinski M, Sadowski M J, *et al.* Cherenkov probes and runaway electrons diagnostics[J]. The European Physical Journal Plus, 2021, **136**(10): 1070. DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01844-8.

- 6 Causa F, Buratti P, Esposito B, *et al.* Cherenkov emission provides detailed picture of non-thermal electron dynamics in the presence of magnetic islands[J]. Nuclear Fusion, 2015, **55**(12): 123021. DOI: 10.1088/0029-5515/55/12/123021.
- 7 Hoppe M, Hesslow L, Embreus O, *et al.* Spatiotemporal analysis of the runaway distribution function from synchrotron images in an ASDEX Upgrade disruption[J]. Journal of Plasma Physics, 2021, **87**(1): 855870102. DOI: 10.1017/S002237782000152X.
- 8 Cheon M S, Seo D, Kim J. Observation of thermal quench induced by runaway electrons in magnetic perturbation[J]. Nuclear Fusion, 2018, **58**(4): 046020. DOI: 10.1088/1741-4326/aab4aa.
- 9 Wu S, EAST Team. An overview of the EAST project[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, **82**(5 - 14): 463 - 471. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2007.03.012.
- 10 温晓东, 徐立清, 胡立群, 等. 离子回旋频率波加热下的 EAST 等离子体锯齿行为研究[J]. 核技术, 2023, **46**(1): 010502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010502. WEN Xiaodong, XU Liqing, HU Liqun, *et al.* Sawtooth behavior of EAST plasma under ICRF heating[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(1): 010502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010502.
- 11 Lu H W, Hu L Q, Li Y D, *et al.* Investigation of fast pitch angle scattering of runaway electrons in the EAST tokamak[J]. Chinese Physics B, 2010, **19**(12): 125201. DOI: 10.1088/1674-1056/19/12/125201.
- 12 Lu H W, Hu L Q, Lin S Y, *et al.* Runaway electron measurements in the EAST tokamak[J]. Contributions to Plasma Physics, 2010, **50**(2): 141 - 145. DOI: 10.1002/ctpp.201010028.
- 13 Agostinelli S, Allison J, Amako K, *et al.* GEANT4—a simulation toolkit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, **506**(3): 250 - 303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- 14 吴承瑞. EAST 长脉冲高约束模式放电的粒子再循环及杂质行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019. WU Chengrui. Study of recycling and impurity behavior in long-pulse H-mode discharges in EAST tokamak[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- 15 王书松, 黄娟, 常加峰, 等. ICRF 加热下 EAST 快离子损失速度空间分布初步研究[J]. 核技术, 2023, **46**(12): 120601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120601. WANG Shusong, HUANG Juan, CHANG Jiafeng, *et al.* Preliminary study of velocity-space distribution of fast-ion loss under ion cyclotron resonance heating in the EAST[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(12): 120601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120601.
- 16 陈伯显, 张智. 核辐射物理及探测学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011. CHEN Boxian, ZHANG Zhi. Physics and detection of nuclear radiation[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2011.
- 17 Klein C A. Room-temperature dispersion equations for cubic zinc sulfide[J]. Applied Optics, 1986, **25**(12): 1873 - 1875.
- 18 周瑞杰. 托卡马克中逃逸电子动力学的实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013. ZHOU Ruijie. Experimental study on runaway electrons dynamics in tokamak[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- 19 Sykora G J, Schooneveld E M, Rhodes N J. ZnO: Zn⁶LiF scintillator—a low afterglow alternative to ZnS: Ag⁶LiF for thermal neutron detection[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **883**: 75 - 82. DOI: 10.1016/j.nima.2017.11.052.
- 20 Zhou R J, Hu L Q, Li E Z, *et al.* Investigation of ring-like runaway electron beams in the EAST tokamak[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2013, **55**(5): 055006. DOI: 10.1088/0741-3335/55/5/055006.