

基于超材料的自由电子辐射研究进展

朱娟峰, 杜朝海*

(北京大学 电子学院, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 自由电子与周围电磁环境相互作用时可以通过不同的形式辐射电磁波。超材料是一种人工复合材料, 可实现传统自然材料所不具备的电磁特性。基于超材料与自由电子之间的相互作用可以打破传统电磁辐射系统的限制, 实现对辐射电磁波的极化、相位、波前等特性的灵活操控, 这为发展新型的自由电子辐射器件提供了新思路。本文简单介绍了切伦科夫辐射、史密斯-珀塞尔辐射的产生机理, 重点回顾了基于超材料的自由电子辐射的最新研究进展, 并对未来的技术发展方向进行了展望。

关键词: 自由电子辐射; 切伦科夫辐射; 史密斯-珀塞尔辐射; 超材料; 超表面

中图分类号: O46 **文献标识码:** A

Research progress of free-electron radiation based on metamaterials

ZHU Juan-Feng, DU Chao-Hai*

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Various types of electromagnetic radiation can be stimulated by free electrons interact with the local electromagnetic environment. Metamaterial is a kind of artificial material, which can achieve unique characteristics that natural material cannot realize. Based on the interaction between the metamaterial and free electron, the radiation characteristics can be flexibly manipulated such as polarization, phase and wavefront, and so on. The related study provides a novel platform for developing novel free-electron radiation devices. This paper briefly introduces the physical mechanism of Cherenkov radiation and Smith-Purcell radiation. Then, the state-of-art of free-electron radiation in metamaterials is introduced. Finally, an outlook of potential research directions for this vigorous realm is provided.

Key words: free-electron radiation, cherenkov radiation, smith-Purcell radiation, metamaterials, metasurface

引言

自由电子的运动根据不同的相互作用条件可以产生多种形式的电磁波辐射, 如韧致辐射、同步辐射、渡越辐射、切伦科夫辐射(Cherenkov radiation, CR)、史密斯-珀塞尔辐射(Smith-Purcell radiation, SPR)等^[1-7]。CR是带电粒子以大于介质中光速的速度在介质中运动时, 所引发的一种电磁辐射; SPR是运动的带电粒子在周期结构表面激励的一种自由空间辐射。自由电子辐射在许多应用领域中扮演着关键的角色, 如韧致辐射是医用X射线的重要来

源; 基于CR效应可以产生高功率密度的电磁辐射, 在真空电子器件、加速器、高能粒子探测等领域有着十分重要的应用等。

超材料(Metamaterials)是对一类人工复合电磁材料的总称。超材料可突破常规材料中固有电磁参数的限制, 实现天然材料不具备的超常电磁波调控能力^[8]。通过对结构单元的特殊设计, 超材料可以实现对电磁波传输相位、波前阵面、极化偏振等特性的多维度调控, 目前已经被成功应用于多个领域, 实现了众多新奇的物理现象和功能器件。超材

收稿日期: 2021-10-20, 修回日期: 2021-11-20

Received date: 2021-10-20, Revised date: 2021-11-20

基金项目: 国家自然科学基金NSAF联合项目(U1830201); 国家自然科学基金(61861130367); 国家自然科学基金(61531002); 英国皇家学会高级牛顿基金(NAF/R1/180121)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China under Contracts (NSAF U1830201, 61861130367, 61531002) and Newton Advanced Fellowship from Royal Society United Kingdom (NAF/R1/180121)

作者简介(Biography): 朱娟峰(1994—), 男, 山西运城人, 博士, 主要研究领域为太赫兹辐射源、表面等离子激元, E-mail: zhujuanfeng@pku.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: duchaochai@pku.edu.cn

料种类繁多,具有许多不同类型,包括当结构单元大小与波长相比拟的光子晶体;介电常数、磁导率均为负的左手超材料;双曲色散型超材料;纵向方向上电尺寸远小于波长的超表面;电磁参数随时间变化的时变材料以及时空材料等^[9-16]。传统的自由电子辐射研究常围绕辐射方向、功率、频率、带宽等特性展开,而基于超材料的功能多样性,自由电子辐射可以突破这些调控维度的限制,实现新的器件结构形式和功能,为天线设计、片上辐射源、高能粒子探测等领域的研究和应用提供新思路。本文主要介绍了CR以及SPR的工作原理,回顾了基于超材料的CR以及SPR的研究现状。最后,对相关领域的技术发展进行了展望。

1 切伦科夫辐射

当带电粒子以大于介质中光速的速度在介质中运动时,所引发的尾迹场辐射被称为CR^[5,6],其形成过程如图1(a)所示。CR效应所形成的辐射能量主要集中在以粒子运动轨迹为轴心的圆锥区域,辐射方向与电子运动方向之间的夹角 θ 可以表征为:

$$\cos\theta = \frac{c}{v_e n(\omega)} = \frac{1}{\beta n} \quad , \quad (1)$$

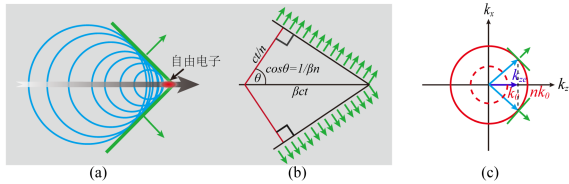


图1 CR的形成过程(a)以及辐射角度示意图(b), (c)在各向同性介质中CR的波矢匹配过程

Fig. 1 The schematic diagram of (a) CR and (b) radiation angle, (c) wavenumber match in an isotropic medium in the generation of CR

其中 c 为真空光速, $v_e = c/\beta$ 为电子运动速度, $n(\omega)$ 为介质材料的折射率, ω 是角频率。由于自由电子的运动速度需超过介质中光速,因而CR效应的产生需满足式(2)的速度阈值条件:

$$v_e > \frac{c}{n} \quad . \quad (2)$$

从波矢匹配的角度来看,CR效应也可以认为是带电粒子所携带的消逝波耦合至介质中快波辐射的过程。以速度 v_e 运动的电子所携带的纵向波矢为:

$$k_{ze} = \frac{\omega}{v_e} > k_0 = \frac{\omega}{c} \quad . \quad (3)$$

由于 $k_{ze} > k_0$,因此电子所携带的电磁波为一种消逝波,能量在垂直于运动方向上指数衰减。以各向同性、折射率为 n 的介质为例,辐射的形成过程可以用图1(c)波矢匹配的理论来解释。图中红色虚线、实线分别表示真空中、介质中的光线色散线,蓝色箭头表示自由电子的色散线。为满足波矢匹配条件,须使得 k_{ze} 位于等频色散线内部,需使得 $nk_0 > k_{ze}$,即 $v_e > c/n$ 。

CR效应由前苏联物理学家P. Cherenkov在实验中首次观测到,并由I. Tamm和I. Frank进行理论解释。因为在CR发现过程中的突出贡献,三位科学家共同获得了1958年的诺贝尔物理学奖。目前CR效应在许多领域中已经取得了广泛的应用。如根据运动速度与辐射角度的关系,基于CR效应的粒子探测器可以用于确定粒子的质量以及能量,这种探测器曾在反质子的发现过程中发挥了关键作用。在真空电子器件领域中,基于CR效应的返波管、行波管等器件可以产生高功率密度的电磁辐射,在高功率雷达、卫星通信、电子对抗等领域扮演着重要的角色。

1.1 基于表面等离激元效应的切伦科夫辐射

表面等离激元(Surface Plasmon Polaritons, SPP)起源于金属与介质界面上电子与电磁波的共振作用,可实现对电磁波的近场局附、表面场增强和多维度操控等。基于SPP的慢波特性和慢波特性,可以实现集成化、微型化的自由电子辐射器。2009年, G. Adamo等人在实验中发现,当电子穿过由Au/SiO₂交错堆叠形成的纳米结构时,可激发出宽谱的光学辐射,其结构如图2(a)所示^[17]。电子科技大学的刘盛纲教授团队对这种实验现象进行了理论解释,发现这种辐射是由于纳米周期结构的衍射辐射效应造成的^[18]。在这种结构中,不存在起振电流阈值,且其辐射频率等特性可以通过电子能量进行调节。2012年,该团队提出了基于光学等离激元材料中CR效应的高功率密度光辐射方案,为片上辐射源的设计提供了一种新思路^[19]。如图2(b)所示,当电子贴近Ag膜表面运动时,可以直接激发薄膜表面的SPP模式。若SPP的相速度大于介质衬底中的光速, SPP可以转化形成介质中的CR。该工作结合了自由电子学和光子学的优势,辐射功率密度可达到 10^8 W/cm^2 ,工作频率可以覆盖从可见光到紫外的范围。由于在低于等离子体振荡频率时, SPP的传输损耗会急剧增加,因此在其他频段需要找到具有类

似等离激元效应的材料。如在太赫兹-红外频段,可以基于石墨烯-介质结构中的石墨烯表面等离激元(Graphene SPP, GSPP)模式来实现CR,其结构如图2(c)所示^[20]。多层石墨烯结构可以对GSPP的色散特性进行调控,并使得其色散线穿过介质光线,满足CR效应的形成条件。此时,GSPP可以转化介质中的CR。由于石墨烯具有优良的导电性,这种方式可提高SPP的近场场强并将辐射功率密度增强约三个数量级。2018年,Tao Jin等提出了基于石墨烯二维平面CR效应的理论模型,结构如图2(d)所示^[21]。在该研究中,CR效应可以由低能量的运动电子激发,且频率、角度等特性可以通过石墨烯费米能级进行调控。该工作为发展低工作电压、多功能、可调谐的新型辐射源提供了一种可行的方案。与石墨烯层相比,周期石墨烯条带结构中的GSPP具有更强的近场局附性,更有利于与电子进行高效相互作用。来自北京大学的刘永强等提出基于周期石墨烯光栅结构中CR效应的太赫兹源方案,模型如图2(e)所示^[22]。电子可以通过相互作用将携带的动能转移至石墨烯表面的GSPP中,在结构末端再将能量放大的GSPP输出,实现高功率太赫兹辐射。

GSPP及其相关应用在低于太赫兹频段工作时会受到传输损耗的限制,因此需要探寻低损耗的等离激元材料。2004年,帝国理工大学的Pendry等提出了通过周期性打孔的方式将电磁波局附在金属表面,这种周期结构表面的电磁波可以模拟SPP的电磁特性,被称为人工表面等离激元(Spoof SPP, SSPP)^[23]。SSPP结构形式灵活多样,电磁特性调节简单易行,是一种实现CR效应的理想平台。根据等效媒质理论,亚波长透射型金属光栅可以等效为各向异性的介质材料,其等效介电常数大小与光栅的占空比成反比。当电子在结构表面运动时可以在光栅中激励出CR,且辐射角度可由工作电压进行调节。更重要的是,在这种等效的各向异性材料中可以实现无阈值的CR,这对设计新型辐射源具有重要的借鉴意义^[24]。基于周期结构中电子与SSPP相互作用也可以实现紧凑、高效的辐射器或加速器。当电子运动速度与SSPP相速度匹配且处于减速相位时,可以将电子所携带的动能转移到SSPP中,实现SSPP能量的放大,进而产生高功率的辐射^[25-27]。反之,如果电子处于加速相位时,可以将电磁能量转化为电子的动能,实现电子的加速^[28]。但是电子-SSPP相互作用也面临着效率较低等技术瓶颈,人们也

提出了许多方法以解决该问题,如采用双光栅、光栅-金属孔阵列-光栅三明治等相互作用电路结构^[27, 29]。这些方法本质上是通过提升相互作用电路结构的耦合阻抗来增加系统的相互作用效率,同时也会不可避免地增加结构复杂度,提升了实验难度。群聚电子束是一个简单有效的方案,结构如图2(g)所示。电子在第一段光栅中经由SSPP相互作用后会群聚成周期的电子束团,群聚频率与SSPP频率相同,此时电子束团会加载有较强的谐波信息。若第二段光栅的相互作用频率是群聚频率的整数倍,则可以产生强相干的超辐射^[30]。这种方式可以有效地降低系统起振电流,同时增加输出功率,在真空电子功率器件中有着重要的应用。电子与SSPP相互作用效率较低的另一个原因是相互作用过程的相速度失配现象。在深度相互作用过程中,由于电子与电磁波的能量变化,造成两者之间的相速度不再匹配,因此电子与SSPP无法保持长距离的相互作用。为了克服该问题,孔令宝等提出一种基于梯度渐变光栅中CR效应的太赫兹辐射源^[31]。在这种相互作用系统中,电子在运动过程中因注-波相互作用损失动能,速度减小;而光栅深度也会梯度变化,使SSPP的相速度能够重新与电子运动速度匹配。这种方式可以使得SSPP与电子持续换能,可以将系统效率提升约10倍。此外,也有其他方式来增强系统的工作效率,如采用高Q值系统。如图2(h)所示,当金属光栅被周期性调制时,该结构中支持出高Q值(可达700)的Fano共振,电子可以在这种谐振结构中激励出受激CR。与均匀光栅中的注-波相互作用相比,该结构可将辐射效率提升约两个数量级^[32]。由于系统周期调制所诱导的布里渊区折叠效应,原本局附于结构表面的SSPP可以辐射到自由空间中,形成CR激光^[33]。连续域束缚态(Bound States In the Continuum, BIC)起源于光子学,是辐射态中的一种奇异态。尽管系统中存在着能量泄漏的辐射通道,但BIC模式并不会与其中任何一个通道产生耦合,理论上具有无穷的Q值,因此也可以用于增强注-波相互作用。Song Yanan等提出了一种基于介质光栅的CR辐射方案(如图2(i)所示),结果显示:BIC可以实现电磁波从倏逝波到行波模式的转化,这种辐射机制在电子速度低于CR速度阈值时也可以工作^[34]。同理,BIC也可以提升其他类型的自由电子辐射效率,如SPR等^[35]。这些探索对低阈值、高效紧凑自由电子激光器的研究具有重要的参考

价值。

1.2 基于负折射率材料的逆向切伦科夫辐射

在介质材料确定的情况下,CR效应的辐射角由粒子的运动速度决定,因此CR可以被用于高能粒子的探测等。如图3(a)所示,在常规介质材料中,带电粒子与CR产生的电磁波沿着相同的方向传播,此时二者之间会相互干扰。若能够使得CR产生的辐射波与粒子运动轨迹分离,上述问题便可得到解决,而负折射率材料中的CR效应则提供了一种有效的解决方案。负折射率材料又称为左手材料,需要介电常数、磁导率同时为负才可以实现。在这种材料中,粒子的运动方向与辐射尾迹波的传播方向相反,为了与常规的CR效应进行区分,一般将这种辐射机理称为逆向切伦科夫辐射(Reversed

Cherenkov Radiation, RCR)。早在1968年,前苏联物理学家Veselago就曾提出了负折射率材料的概念并预言了RCR现象的存在,受限于传统材料特性的限制,RCR现象一直未能得到实验验证^[36]。在1996年以及1999年,J. B. Pendry等分别提出利用周期排列的金属细线阵列以及金属开路环谐振器实现等效介电常数、磁导率为负的介质^[37, 38]。2001年,Shelby R A等将上述两种结构组合起来,首次设计了双负材料并成功地验证了负折射现象^[39],这些研究为后续RCR的验证提供了重要的理论基础。

2009年,来自浙江大学的奚圣等利用正交的金属条以及开口谐振环构建了双负材料,结构如图3(a)所示^[40, 41]。为了便于实验观察,其利用偶极子阵列模拟运动的自由电子,最终根据辐射信号与接收

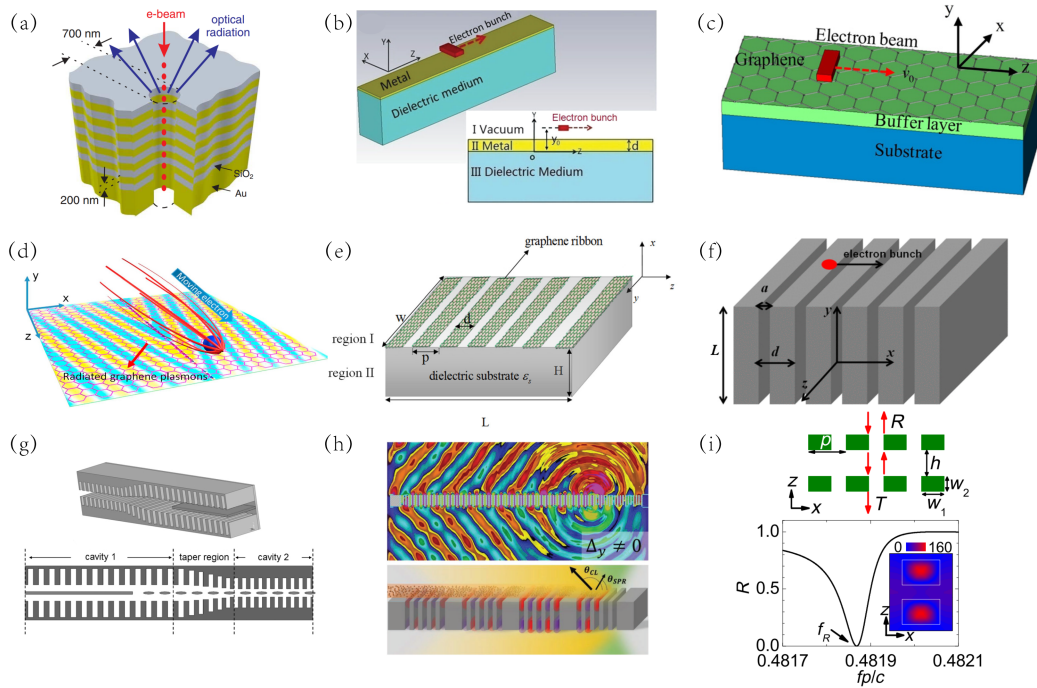


图2 (a) 电子在纳米孔状结构中激励光辐射的结构示意图, (b) 电子在Ag-介质结构中激励光学CR的模型示意图, (c) 电子在多层石墨烯-介质结构中激励CR的结构示意图, (d) 石墨烯表面的二维CR效应, (e) 基于电子与周期石墨烯条带光栅结构中的GSPP相互作用产生的太赫兹辐射, (f) 在金属光栅超材料中激励无阈值CR的结构示意图, (g) 基于二段光栅的超辐射示意图, 直流电子束经Cavity 1中的SSPP波群聚后可以在Cavity 2中激励出超辐射, (h) Fano光栅中激励CR激光的形成过程, 由于布里渊区折叠效应, CR可以辐射到自由空间中, (i) 基于介质光栅中BIC实现的CR激光器结构示意图, 结构参数变化时的谐振曲线以及谐振电场分布

Fig. 2 (a) Schematic model of light generation in a nanoscale hole, (b) light CR generation in Ag-dielectric structure with the excitation of the free electron, (c) physical diagram of stimulating CR in multi-layers grapheme, (d) in-plane CR in the grapheme, (e) terahertz radiation generation based on the beam-wave interaction in the periodic graphene ribbons, (f) CR in metallic grating metamaterials, (g) super-radiation in a two-section structure. The DC electron beam is converted into electron bunches in cavity 1, and then stimulates the super-radiant radiation in cavity 2, (h) generation of CR lasing in Fano grating. The CR is transformed into a spatial beam via Brillouin zone folding effect, (i) CR based on BIC in the dielectric grating. The resonance curve with different structural parameters. Inset: the resonant electric field distribution

角度的关系间接地验证了RCR。由于该实验中是利用偶极子天线阵列而非电子进行激励,因此该实验本质上仍可以归结为左手材料负折射率特性的验证^[42]。电子科技大学的段兆云等也对RCR有关物理现象进行了深入的研究,他们对左手材料中RCR的辐射激励条件、辐射频谱、能流密度等物理特性进行了详尽的分析,并提出了圆波导结构填充双负材料的RCR结构模型^[43-44]。2017年,该团队提出了由方波导以及开口谐振环构成的全金属左手超材料,并基于该结构完成了RCR现象的实验验证^[45]。结构如图3(b)所示,电子束在超材料中由左向右运动,并在结构左端口接收到辐射功率信号,这意味着该相互作用系统中电子运动方向与辐射电磁波的传输方向相反,与RCR的物理性质相符合。除利用左手材料外,基于等离激元材料也可以实现RCR效应。其模型如图3(c)所示,电子在金属-绝缘体-金属波导中运动以激励SPP。若满足CR阈值条件,SPP可以转换为金属中的CR,且辐射方向可由波导间隙调控。当间隙较小时,结构会出现负群速度的色散特性,此时可以使得CR的辐射方向从正向切换向反向,即RCR^[46]。这种方案简单易行,避免了复杂的超材料单元结构设计。

RCR在高能粒子探测、加速器、高功率辐射源等系统中也有着广泛的应用^[47, 48]。麻省理工学院的

Lu Xueying提出基于RCR效应的粒子加速方案^[49]。超材料单元结构如图3(d)所示,该结构在TM模式工作时表现负群速度的特性,因此电子束可以在该超材料中激励出高功率RCR尾场辐射;通过相干尾波叠加,其最大输出功率可达80 MW。这种金属超材料结构简单、调整灵活,且可以产生高功率、高梯度的尾迹场,对设计新一代粒子加速器具有重要意义^[50-52]。超材料单元设计依赖于结构中的谐振效应,因而具有很高的系统耦合阻抗;其结构单元是亚波长量级,可以缩小器件的体积设计,因此RCR效应也为发展高效紧凑的真空电子器件提供了新途径^[47, 48, 53-56]。图3(e)展示了麻省理工学院团队提出的RCR返波管方案,其可以在2.6 GHz的工作频率上产生5.75 MW的输出功率,工作效率为14%^[56]。

1.3 基于双曲超材料的切伦科夫辐射

在常规介质中,粒子运动速度需要满足式(2)的阈值条件才可以激励CR效应,这为CR效应的应用增加了许多限制,而双曲超材料(Hyperbolic Meta-Materials, HMM)则可以消除CR辐射阈值。HMM是一种各向异性的人工超材料,因其双曲型的等频色散曲线而得名,其本征色散方程可用式(4)来描述^[12]。

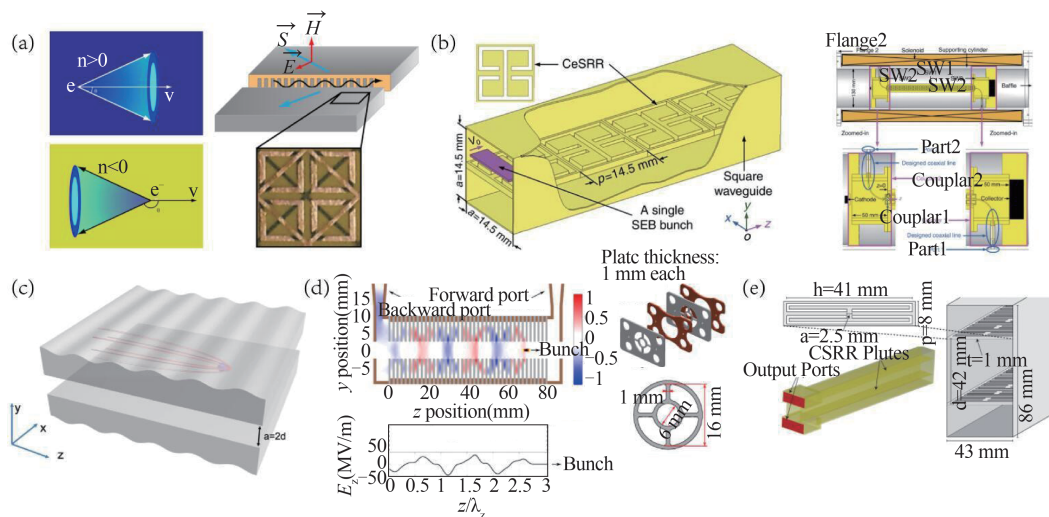


图3 (a)左:RCR的工作原理示意图,右:利用偶极子天线阵列的RCR实验示意图,(b)段兆云等提出的RCR实验结构图,(c)基于SPP的RCR结构示意图,电子在金属波导间隙中穿过以激励RCR,(d)应用于粒子加速的RCR振荡器,(e)基于RCR效应的返波振荡器结构示意图

Fig. 3 (a) Left: the schematic model of RCR. Right: experimental setup based on dipole antenna array, (b) experimental setup of RCR verification proposed by Duan Zhaoyun *et al.* (c) the schematic diagram of CR in plasmonic materials. CR is excited while the electron moves through the waveguide gap, (d) high-power RCR radiation source for particle acceleration, (e) the schematic model of backward wave oscillator based on RCR effect

$$\frac{k_x^2}{\varepsilon_z} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_x} = k_0^2, \quad (4)$$

其中 ε_x 、 ε_z 分别为 x 、 z 方向的介电常数。如图 4(a) 所示, 根据双曲线的开口方向, 可以将 HMM 分成 I 类 ($\varepsilon_x < 0, \varepsilon_z > 0$) 和 II 类 ($\varepsilon_x > 0, \varepsilon_z < 0$) 两种。不同于各向同性材料, HMM 中能够支持倏逝波的传播, 能流方向沿着色散线法线方向, 这使得 HMM 具有许多独特的应用。根据波矢匹配原则, 可以得到: 在 I 类 HMM 中, 任意速度运动的带电粒子均可以激励 CR, 即: 不存在 CR 阈值; 在 II 类 HMM 中, 阈值条件为 $v_e < c/\sqrt{\varepsilon_x}$, 即: 不存在最低速度阈值, 但存在一个最高速度阈值。综上所述, HMM 可以消除 CR 的最小速度阈值, 这为发展片上 CR 器件提供了一个有效的途径。

2017 年, 来自清华大学的刘仿等提出了基于 II 型 HMM 的无阈值集成 CR 光辐射芯片方案, 其结构如图 4(b) 所示^[57, 58]。在该实验中, 电子由钼电极发射, 在由 Au 和 SiO₂ 薄膜交错堆叠实现的 HMM 中激励 CR。为了便于实验探测, 在 HMM 材料下方加载一个缝隙天线以将 CR 电磁能量辐射到自由空间中。尽管受到环境噪声的干扰, 这个实验仍能观察到电子能量为 0.25 keV 的电磁辐射, 覆盖 500~900 nm 的波长范围。事实上, 考虑到空间的非局域性, 基于 HMM 的 CR 仍存在一个非零的最低速度阈值。南洋理工大学的胡昊等从有限边界材料中的空间色散以及非局域电子镜像效应的理论出发分析了结构参数等因素对 CR 阈值的影响, 得到了 HMM 中 CR 效应的最低速度阈值, 这对丰富片上辐射器件的研究具有十分重要的借鉴意义^[59]。由于在利用多层介质堆叠构建 HMM 时需要介电常数异号的介质才可以实现, 受到材料等离子体频率的限制, 基于 Au/SiO₂ 实现的 HMM 只能在可见光和近红外波段工作。如果要设计实现其他工作频段的 HMM, 就需要选取相应频段中负介电常数的材料。如 Si 在极紫外波段表现出负介电常数特性, 因此可以利用 Si/SiO₂ 构建 HMM^[60]。石墨烯在太赫兹至红外波段可以等效为负介电常数的介质, 也可以用于实现了 HMM。电子科技的 Feng xiaodong 等利用石墨烯以及介质材料构建了太赫兹波段的 HMM, 并利用电偶极子在 HMM 中激发 CR, 结构如图 4(c) 所示^[61]。数值仿真和理论分析表明, HMM 中石墨烯层间 GSPP 的相互耦合可将辐射的峰值功率流增强一个数量级, 且辐射角度可以由石墨烯的化学势来进行调

节。更进一步, 如果将石墨烯 HMM 横向分割成周期光栅结构, 则单轴的 HMM 会转化为双轴 HMM 材料, 电子在其表面可以激励出二维平面的 CR 模式 (结构如图 4(d) 所示)^[62]。相比于石墨烯 HMM, 这种 HMM 光栅结构可以将 CR 的辐射功率提升约两个数量级。

许多各向异性材料如六角氮化硼 (h-BN)、铋化铋 (Bi₂Te₃) 等具有多层结构的组成形式, 因此具有天然的双曲色散特性。这些二维材料的内部层状结构可以达到单原子层的厚度, 意味着可以支持更大的电磁波矢, 能够实现更低的辐射阈值^[63]。如图 4(e) 所示, 运动的电子可以在 h-BN 表面激发声子极化激元, 同时产生 CR 和 RCR 两种辐射现象。辐射波长、角度分别可以通过 h-BN 的厚度、电子能量等参数进行调节。来自清华大学的屈拓等研究发现, 利用 h-BN 的双曲特性可以将 CR 效应的电子能量阈值降低到 1 eV 量级, 结构如图 4(f) 所示^[64]。由于低电子能量的 CR 激发以及实验探测较为困难, 上述相关研究都主要集中于理论研究层面。为了进一步探究片上 CR 的物理特性, 人们也开始寻求一些新方法。如图 5(a) 所示, Patrice Genevet 等发现当一束 S 极化的光速斜入射到一个狭缝上时, 会在狭缝上产生一个幅值正弦波动的极化波 (类似于一个偶极子天线阵列); 因其与运动电子的电流密度分布相同, 可以用来模拟运动的电子^[65]。若这种极化波的相速度大于 SSP 的相速度, 会在这种狭缝天线周围激励出向远处传播的 SPP 模式, 整个过程与 CR 效应相类似。通过调整金属狭缝的方向等参数, 可以操控 SPP 尾迹波的运动方向。来自上海交通大学的 Zhang Yiran 等则利用了相似的等效方法对基于 h-BN 的 CR 现象进行了实验证明^[66]。当光入射到 Ag 纳米线上时, 会在 Ag 上产生偶极子振荡。这种振荡会激励起 h-BN 中的声子极化激元模式, 当沿着材料表面向远场传播时, 便形成了 CR 辐射。图 5(b) 中则展示了该实验的原理示意图以及 AFM 探测的场强分布。这些天然材料避免了人工双曲材料的复杂设计过程, 为研究光与物质互作用提供了新的平台, 也为低电子能量的片上辐射源射设计提供了新的思路。

1.4 切伦科夫辐射在粒子探测领域的应用

传统的 CR 探测器中, 辐射角度灵敏度随着粒子速度的增加而减小。为了提高高能粒子的探测灵敏度, 需采用介电常数趋近于 1 的介质材料, 但同

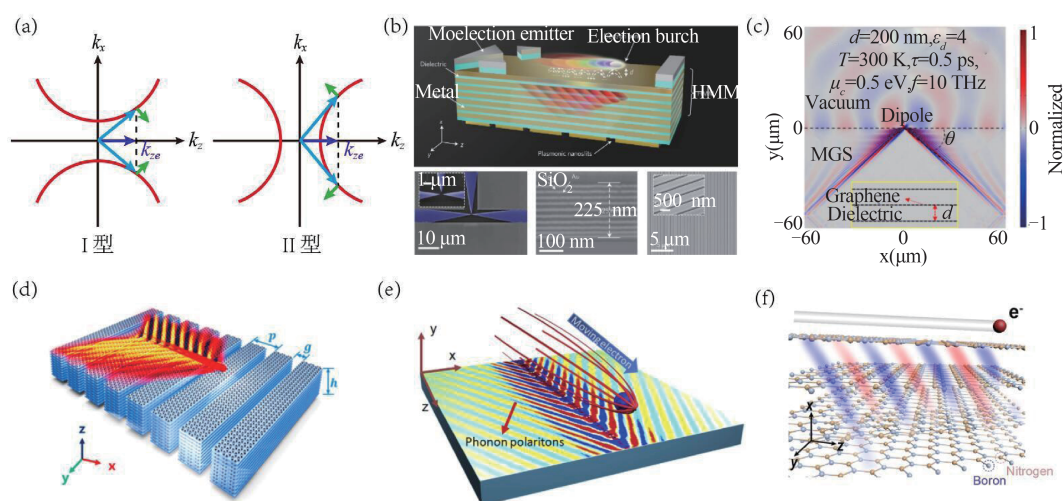


图4 (a)基于HMM的CR机制中的波矢匹配示意图,(b)基于Au/SiO₂光学HMM材料中的无阈值CR光芯片,(c)偶极子在石墨烯HMM中激励太赫兹CR示意图,(d)在石墨烯双曲光栅结构中的二维CR效应,(e)基于h-BN声子激元的二维CR示意图,(f)基于h-BN的低阈值CR示意图

Fig. 4 (a) Wavenumber matching of CR in HMM, (b) top: on-chip CR source in Au/SiO₂ HM, (c) physical diagram of CR excited by a dipole in graphene HMM, (d) in-plane CR radiation in a graphene HMM grating, (e) in-plane photon CR in h-BN, (f) low threshold CR in h-BN

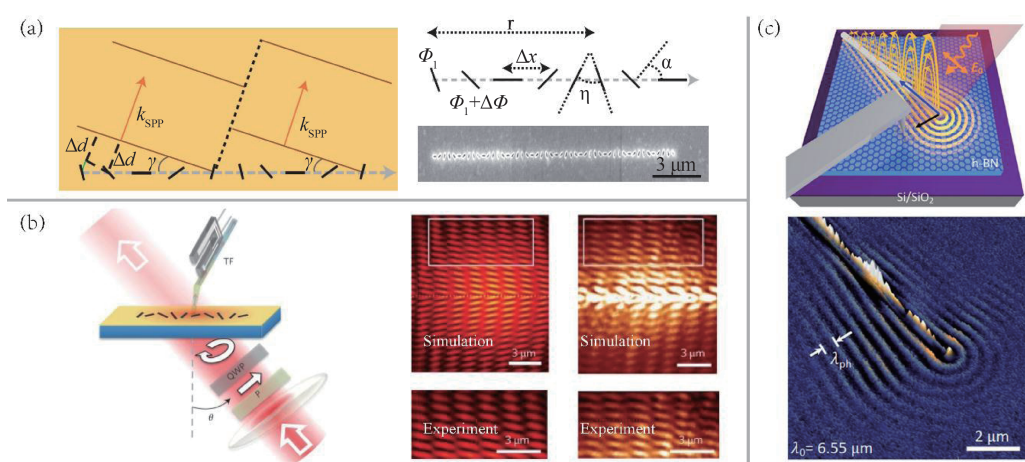


图5 (a)利用纳米缝隙阵列激发、控制SPP传播方向的模型示意图以及实物加工图,(b)左:实验示意图以及实验、仿真结果对比,(c)基于h-BN中的声子激元CR现象的实验示意图(上)以及实验结果分布图(下)

Fig. 5 (a) Excitation and manipulation of SPP in a nano-silt array, and the fabricated sample, (b) left: experimental setup of manipulation of SPP and the comparison between the simulation and measured results, (c) top: experimental verification of CR based on phonon polariton in h-BN. Bottom: experimental results

时会增加电子速度阈值。如何在保持低速度阈值的同时提高探测灵敏度则成为了一个技术挑战。而光子晶体、变换光学超材料等方法则可以有效地突破这一技术限制。光子晶体超材料的电磁特性可以通过结构参数灵活操控,因此也为控制自由电子辐射提供了一条额外的途径。2003年,来自麻省理工学院的Luo Chiyan分析了电子在光子晶体中运动时的电磁辐射特性,发现这种材料中可以实现无

阈值的CR效应,且在不同速度区间内分别可以产生前向和反向的辐射模式^[67]。来自浙江大学的林晓等提出利用一维光子晶体来增强CR探测器灵敏度。如图6(a)所示,带电粒子垂直于分界面穿过由两种透明介质构成的光子晶体以激励CR^[68]。在不同分界面处的渡越辐射波连续干涉下可以分别形成前向以及反向的CR效应。这种方式可以通过选取不同的结构参数以适应不同速度区间的探测需

求,为设计高灵敏度的高能粒子CR探测器提供了一个可行的方案。为了拓展CR探测器的工作带宽,林晓等提出了基于布儒斯特角的CR探测器^[69]。通过选取合适的结构参数,光子晶体可以实现一个超宽带的角度滤波器,即:入射波只有以布儒斯特角入射到材料表面时^[70, 71]。结构如图6(b)所示,当电子在透明介质中穿过时,其引发的CR辐射波将透射到布儒斯特滤波器上。只有以布儒斯特角入射到滤波器表面的辐射波才可以透过该介质,会在远场中形成两条对称的强度分布谱,通过测量辐射谱线与中线的距离则可以反推出粒子速度。这种方案将传统探测器中的角度测量转换为谱线峰值的距离测量,同时也使得远程粒子探测成为可能。此外,变换光学超材料也可以用于提高CR辐射器的灵敏度。如图6(c)所示,电子在各向异性的变换光学材料中激励出CR效应。由于坐标系的变换,

圆锥形的辐射场会被横向拉伸成椭圆形,因此横向分辨率被提升^[72]。传统的CR探测器仅仅局限于粒子的速度探测,对粒子的运动轨迹则无法有效响应,来自南洋理工大的胡昊等提出利用Dyakonov表面波的方法来实现粒子速度、轨迹的双重探测^[73]。如图6(d)所示,若粒子运动轨迹与双轴晶体 YVO_4 的光轴达成某一特定角度,则可以在晶体中激励出Dyakonov表面波,此时辐射强度会急剧增加。这种探测器结构紧凑、灵敏度高,为粒子探测增加了一个全新的自由度。

2 史密斯-珀塞尔辐射

当带电粒子在周期结构表面飞过,会在自由空间产生电磁辐射。辐射波长、角度与运动速度之间的关系可以描述:

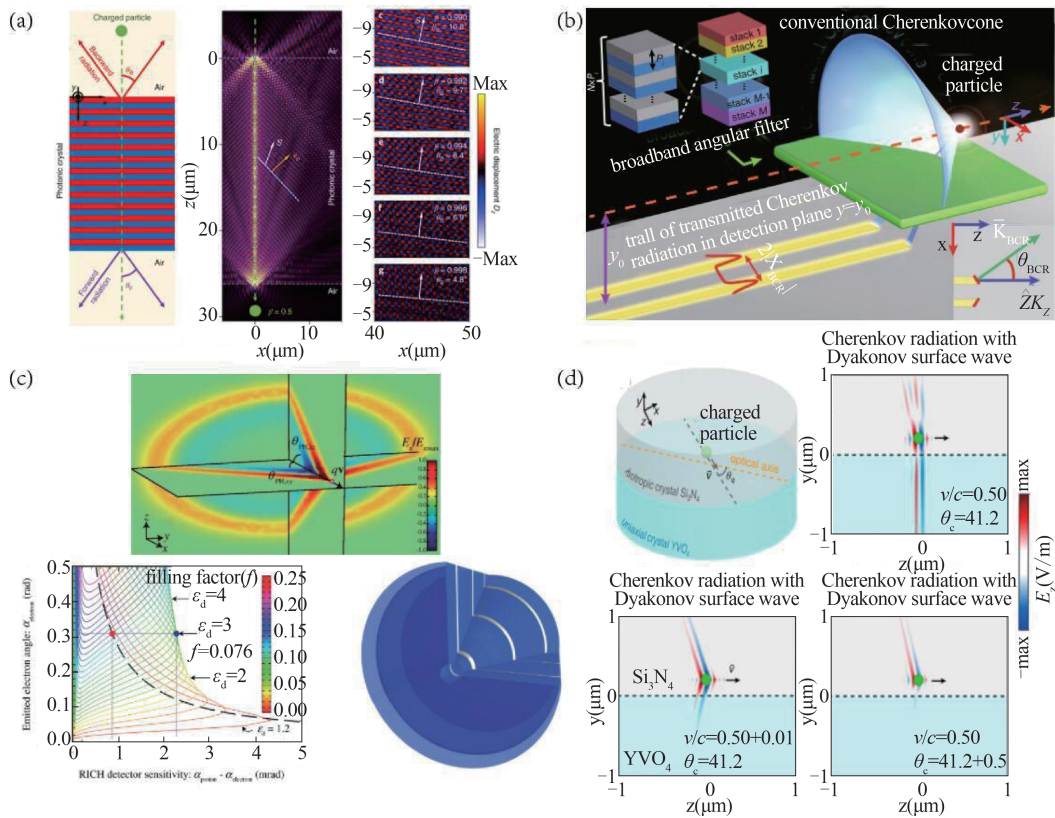


图6 (a)利用一维光子晶体调控CR的辐射方向。从左至右分别是模型示意图、前向辐射模式下的场图分布,(b)基于布儒斯特角滤波器的CR探测器模型示意图,(c)基于变换光学材料中的CR探测器场图分布、探测灵敏度以及模型示意图,(d)基于Dyakonov表面波的CR探测器计算模型示意图以及不同运动情形下的辐射电场分布

Fig. 6 (a) Manipulation radiation angle by one-dimensional photonic crystal. Left: schematic diagram. Right: electric field distribution in forward radiation pattern, (b) the schematic diagram of CR detector based on Brewster angle filter, (c) electric field distribution, detect sensitivity and schematic diagram CR in a transform optics metamaterial, (d) the schematic of CR in a semi-infinite isotropic medium Si_3N_4 and a semi-infinite uniaxial crystal YVO_4 , and time-domain radiation-field distributions with different trajectories and velocities

$$\lambda = \frac{L}{|m|} \left(\frac{c}{v_e} - \cos\theta \right), \quad (5)$$

其中 λ 为辐射波长, L 为光栅周期, θ 为辐射角度, m 为辐射阶次。SPR是通过采用周期结构的方法来改变光的相速度,进而消除了CR效应的速度阈值。从波矢匹配的角度来看,无论是介质材料中的CR还是基于光栅结构的SPR,其本质上都是将电子携带的消逝波转化成行波,因此SPR可以归结为一种特殊的CR效应。SPR效应由于其独特的物理特性,在众多领域中有着广泛的应用,如基于SPR效应的奥罗管工作频段可以覆盖到微波至太赫兹波,是一种重要的功率器件。

2.1 基于超表面的史密斯-珀塞尔辐射研究

传统的SPR研究主要集中于辐射效率、频谱相干性的提升等方面,而对极化、波前、相位的操控鲜有关关注。超材料具有优异的电磁波调控能力,将赋予SPR更灵活的调控能力。本章节将对基于超表面结构的SPR效应操控进行简要回顾。

2016年,王作佳等提出利用开口谐振环单元组成的Babinet超表面来调控SPR的极化状态,结构如图7(a)所示^[74]。得益于谐振单元的双各向异性,当电子平行于结构表面运动时,可以产生具有交叉极化特性的辐射波束。辐射电磁波的极化方向与谐振单元的开口方向保持一致,根据此特性可以完成对电磁波的极化调控。与传统光栅相比,基于超表面的SPR效应可以将效率提高约84%。2020年,Li Lin等根据波矢匹配原理,利用介质表面的光学SPP来模拟电子所携带的消逝波完成了该理论工作的实验验证^[75]。在该实验中,超表面结构不仅可以操控辐射波束的极化方向,而且可以通过操控相位分布实现辐射波束的自聚焦。基于超表面灵活的相位调控能力也可以对SPR的辐射角度进行操控,实现“异常SPR效应”^[76]。当运动电子在超表面结构飞过,会在结构单元处产生附加相移,根据斯涅尔定律可以得到广义的SPR色散公式:

$$\sin\theta = \frac{c}{v_e} - m \frac{\lambda}{p} + \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\varphi}{dz}, \quad (6)$$

其中, $d\varphi/dz$ 是超表面沿着电磁波传播方向的梯度相位。通过改变式(6)中的相位梯度,可以实现重塑SPR辐射角度。如图7(c)所示,垂直法向辐射的波束可以在超表面的调控下分别可以实现前向、返向的辐射。在该研究中,作者利用偶极子阵列模拟运动的带电粒子在微波波段完成了实验验证,实验结果与理论吻合得较好。结合石墨烯的优异电调

控性能,超表面可以实现对SPR效应的振幅、相位、偏振等参数的“全面操控”。美国东北大学的Su Zhaoxian等对基于石墨烯超表面的SPR物理性质进行探究^[77]。辐射波束的振幅、相位可以分别通过结构单元的几何参数、方向来操控。基于该结构优异的调控性能,可以实现具有双焦点的辐射聚焦波束以及相位可控的圆极化辐射波束。

基于超结构也可以实现对SPR的波前操控,实现涡旋波束辐射。螺旋周期结构因其角向的螺旋特性可以重塑电磁波的波前,这种特性在产生涡旋波束方面具有天然的优越性。如图7(e)所示,当运动电子穿过金属螺旋带时会产生SPR涡旋辐射场,涡旋波束与结构的手性保持一致^[78]。北京大学杜朝海课题组发现,利用螺旋光栅表面的SPR效应也可以产生宽带的涡旋辐射场(结构如图(f)所示),且涡旋波束的拓扑荷与光栅槽数、工作谐波成正比^[79]。为了提高辐射波束的相干性,该课题组又提出双段光栅中的SPR超辐射方案^[80]。结构如图7(g)所示,直流电子束经由第一段光栅的相互作用后群聚成周期性的电子束团;在第二段螺旋光栅中,群聚电子束团将谐波能量辐射到自由空间的同时也会转换成涡旋波束。这种基于SPR效应的辐射器可以摆脱馈源频率的限制,在电子能量、结构参数的调控下可以实现任意频段、任意模式的涡旋波束,在通信等领域中有着广泛的应用前景。

3 总结与展望

超材料可以突破常规自然材料电磁特性的限制,实现超常的电磁特性调控。基于超材料的自由电子辐射也可突破传统辐射机制的限制,实现对辐射波束的相位、极化、波前以及起振阈值等方面的灵活操控,这为发展新型自由电子辐射源和探索新应用提供了思路。本文首先简要回顾了CR效应及SPR效应的工作原理,在此基础上回顾了基于超材料结构的CR效应以及SPR效应的研究进展。重点介绍了基于表面等离激元材料的CR效应、负折射率材料中的RCR效应、HMM的低阈值CR效应、基于光子晶体结构的CR探测器、超表面对SPR效应的调控特性以及基于SPR效应的涡旋波束辐射器等方面。伴随着超材料理论的发展,基于超材料的自由电子辐射研究也会逐渐丰富,新颖的辐射现象将会不断涌现,也会推动辐射源、探测器、加速器等相关应用的不断进步。

当前阶段,受限于自由电子源的实验条件限

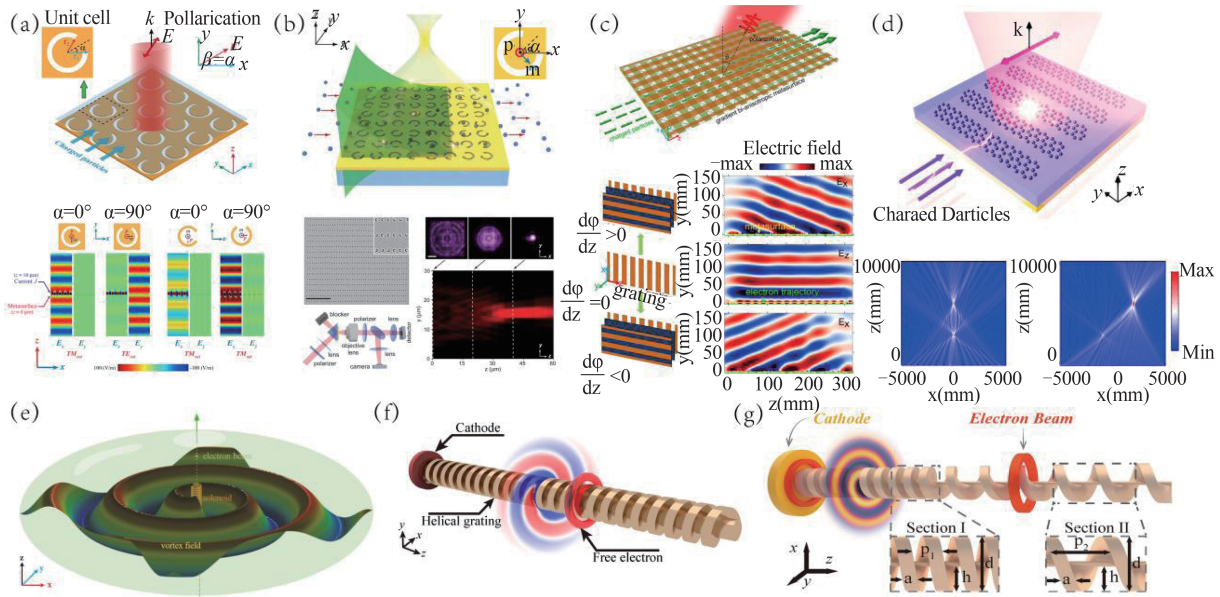


图7 (a)基于Babinet超表面的SPR极化特性操控,(b)利用超表面操控SPR辐射特性的实验示意图以及实现的聚焦光束,(c)利用超表面对SPR辐射方向的操控,(d)基于石墨烯超表面实现的双焦点SPR波束,(e)基于螺旋线中的SPR效应产生涡旋场,(f)基于螺旋光栅结构中的SPR效应的涡旋波束产生器,(g)利用双段光栅中的超辐射效应产生涡旋波束的结构示意图

Fig. 7 (a) Manipulation polarization of SPR based on Babinet metasurface, (b) experimental setup of manipulation of SPR, and the electric distribution of focusing beam, (c) control the angle of SPR by metasurface, (d) dual focal points focusing based on the graphene metasurface, (e) generation of vortex beam based on SPR effect in a helical wire, (f) vortex beam generation based on SPR from a helical grating, (g) generating vortex beam based on the super-SPR effect in a two-section grating

制,许多基于超材料的自由电子辐射研究仍停留于理论分析和仿真模拟层面。在实验层面,许多研究工作采用偶极子阵列来模拟运动电子的方式进行实验验证,真正基于自由电子辐射实验尚不充分。随着新材料、新工艺、和实验条件的进步,超构材料中自由电子辐射的实验研究工作会逐渐丰富,这为新型的集成化高效率辐射源、片上粒子探测器等实际应用带来新的机遇。此外,目前的超材料的主要研究对象为空间型调制媒质(spatially modulated media),而时间调制媒质(temporally modulated media)和时空调制媒质(spatiotemporally modulated media)的研究刚刚兴起,这为电子辐射研究注入了新的活力^[14, 81-83]。时空调制媒质与空间调制媒质有着本质的区别:(1)、在空间调制媒质系统中,媒质-电子具有的总能量从根本上限制了自由电子的能量交换极限,而在时变介质中通过时间维度引入了新的能量,局部系统的能量守恒规律被打破。例如,与光子晶体相似,光子时间晶体(Photonics Time-Crystal, PTC)也会形成带隙;若互作用点位于PTC的带隙内,则可以实现能量的参量放大^[82]。(2)、空间介质保持时间反转对称性,而这种对称性在时空介质中则会被打破。(3)、由于引入了时域的调制,时空调

制媒质中的操控自由度得到了扩展。如基于时变材料中可以实现超光速的调制速度,进而实现真空环境中的CR效应^[84]。基于时变材料的自由电子辐射现象研究将有助于探究更多新奇的物理现象,如在打破时间反转对称性后,辐射性能会如何受到影响?在微观粒子角度,量子电子辐射效应也逐渐受到人们关注与思考^[85],经典电磁辐射理论与量子电磁辐射理论有何不同?这些研究将在微观角度帮助研究理解辐射的本质,催生更多的物理应用。最后,新兴二维材料也将为自由电子辐射提供一个崭新的平台,这些材料如基于石墨烯材料中的自发辐射、受激辐射现象为下一代片上集成光源提供了新方案^[86, 87]。

References

- [1] Koch H. W., Motz J. Bremsstrahlung cross-section formulas and related data[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1959, **31**(4): 920.
- [2] Elder F., Gurewitsch A., Langmuir R., et al. Radiation from electrons in a synchrotron[J]. *Phys. Rev.*, 1947, **71** (11): 829.
- [3] Ginzburg V. Transition radiation and transition scattering [J]. *Phys. Scr.*, 1982, 1982(T2A): 182.
- [4] Happek U., Sievers A., Blum E. Observation of coherent transition radiation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67** (21): 2962.

- [5] Čerenkov P. Visible light from pure liquids under the impact of γ -rays[J]. *Dokl. Acad. Sci. URSS*, 1934.
- [6] Frank I. Tamm I., Coherent visible radiation of fast electrons passing through matter[J], *Selected Papers*, 1991, Springer. p. 29–35.
- [7] Smith S. J. Purcell E. Visible light from localized surface charges moving across a grating[J]. *Phys. Rev.*, 1953, **92** (4): 1069.
- [8] Zheludev N. I. Kivshar Y. S. From metamaterials to metadevices[J]. *Nat Mater.*, 2012, **11**(11): 917–924.
- [9] Marqués R., Medina F. Rafii-El-Idrissi R. Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**(14): 144440.
- [10] Joannopoulos J. D., Villeneuve P. R. Fan S. Photonic crystals: putting a new twist on light[J]. *Nature*, 1997, **386** (6621): 143–149.
- [11] Li Yang, Kita S., Muñoz P., et al. On-chip zero-index metamaterials [J]. *Nat. Photonics*, 2015, **9** (11) : 738–742
- [12] Poddubny A., Iorsh I., Belov P., et al. Hyperbolic metamaterials[J]. *Nat. Photonics*, 2013, **7**(12): 948–957.
- [13] Chen Hou-Tong, Taylor A. J. Yu Nanfang. A review of metasurfaces: physics and applications [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2016, **79**(7): 076401.
- [14] Galiffi E., Huidobro P. Pendry J. Broadband nonreciprocal amplification in luminal metamaterials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2019, **123**(20): 206101.
- [15] Rogov A. Narimanov E. Space - time metamaterials [J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(7): 2868–2877.
- [16] Vezzoli S., Bruno V., DeVault C., et al. Optical time reversal from time-dependent epsilon-near-zero media [J]. *Physical review letters*, 2018, **120**(4): 043902.
- [17] Adamo G., MacDonald K. F., Fu Y., et al. Light well: a tunable free-electron light source on a chip[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(11): 113901.
- [18] Liu Shenggang, Hu Min, Zhang Yaxin, et al. Theoretical investigation of a tunable free-electron light source [J]. *Phys. Rev. E*, 2011, **83**(6): 066609.
- [19] Liu Shenggang, Zhang Ping, Liu Weihao, et al. Surface polariton Cherenkov light radiation source [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, **109**(15): 153902.
- [20] Zhao Tao, Hu Min, Zhong Renbin, et al. Cherenkov terahertz radiation from graphene surface plasmon polaritons excited by an electron beam[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, **110**(23): 231102.
- [21] Tao Jin, Wu LinZheng Guoxing, Graphene surface-polariton in-plane Cherenkov radiation [J]. *Carbon*, 2018, **133**: 249–253.
- [22] Liu Yong-Qiang, Liu Pu-Kun, Excitation of surface plasmon polaritons by electron beam with graphene ribbon arrays[J]. *J. Appl. Phys.*, 2017, **121**(11): 113104.
- [23] Pendry J., Martín-Moreno L. García-Vidal F. Mimicking surface plasmons with structured surfaces [J]. *Science*, 2004, **305**(5685): 847–848.
- [24] So J. K., Won J. H., Sattarov M., et al. Cherenkov radiation in metallic metamaterials[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97** (15): 151107.
- [25] Liu Yong-Qiang, Kong Ling-Bao, Du Chao-Hai, et al. Spoof surface plasmon modes on doubly corrugated metal surfaces at terahertz frequencies[J]. *J. Phys. D*, 2016, **49** (23): 235501.
- [26] Liu Yong-Qiang, Kong Ling-Bao, Du Chao-Hai, et al. A terahertz electronic source based on the spoof surface plasmon with subwavelength metallic grating [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2016, **44**(6): 930–937.
- [27] Liu Yong-Qiang, Du Chao-Hai, Liu Pu-Kun, Terahertz electronic source based on spoof surface plasmons on the doubly corrugated metallic waveguide [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2016, **44**(12): 3288–329
- [28] Kong Ling-Bao, Chen Zhaoyang, Plasmonic electron acceleration with the meta-surfaces [J]. *Phys. Plasmas*, 2017, **24**(8): 083111.
- [29] Zhang Ping, Zhang Yaxin, Hu Min, et al. Diffraction radiation of a sub-wavelength hole array with dielectric medium loading[J]. *J. Phys. D*, 2012, **45**(14): 145303.
- [30] Zhang Ya-Xin, Zhou Yu-Cong, Dong Liang, et al. Coherent terahertz radiation from high-harmonic component of modulated free-electron beam in a tapered two-asymmetric grating structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **101** (12): 123503.
- [31] Kong Ling-Bao, Huang Cheng-Ping, Du Chao-Hai, et al. Enhancing spoof surface-plasmons with gradient metasurfaces[J]. *Sci. Rep.*, 2015, **5**(1): 1–5.
- [32] Kim S., Baek I. K., Bhattacharya R., et al. High-Q Metallic Fano Metamaterial for Highly Efficient Cherenkov Lasing. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, **6**(12): 1800041.
- [33] Bera A., Barik R. K., Sattarov M., et al. Surface-coupling of Cherenkov radiation from a modified metallic metamaterial slab via Brillouin-band folding[J]. *Opt. Express*, 2014, **22**(3): 3039–3044.
- [34] Song Yanan, Jiang Ningxiao, Liu Liu, et al. Cherenkov radiation from photonic bound states in the continuum: towards compact free-electron lasers [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2018, **10**(6): 064026.
- [35] Yang Yi, Massuda A., Roques-Carnes C., et al. Maximal spontaneous photon emission and energy loss from free electrons[J]. *Nature Phys.*, 2018, **14**(9): 894–899.
- [36] Viktor G. V. *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ* . *Sov. Phys. Usp.*, 1968, **10**(4): 509.
- [37] Pendry J. B., Holden A., Stewart W., et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(25): 4773.
- [38] Pendry J. B., Holden A. J., Robbins D. J., et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Trans. Microw. theory Techn.*, 1999, **47**(11): 2075–2084.
- [39] Shelby R. A., Smith D. R. Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77–79.
- [40] Xi Sheng, Chen Hongsheng, Jiang Tao, et al. Experimental verification of reversed Cherenkov radiation in left-handed metamaterial [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103** (19): 194801
- [41] Chen Hongsheng, Chen Min, Flipping photons backward: reversed Cherenkov radiation [J]. *Mater. Today*, 2011, **14**(1–2): 34–41.
- [42] Zhang Shuang, Zhang Xiang. Flipping a photonic shock

- wave[J]. *Physics*, 2009, **2**: 91.
- [43] Duan Zhaoyun, Wu B.I., Lu Jie., et al. Reversed Cherenkov radiation in a waveguide filled with anisotropic double-negative metamaterials[J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **104** (6): 063303.
- [44] Duan Zhaoyun, Wu B.I., Lu Jie., et al. Cherenkov radiation in anisotropic double-negative metamaterials[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(22): 18479–18484.
- [45] Duan Zhaoyun, Tang Xianfeng, Wang Zhanliang, et al. Observation of the reversed Cherenkov radiation[J]. *Nat. Commun.*, 2017, **8**(1): 1–7.
- [46] Tao Jin, Wang Qi Jie, Zhang Jingjing, et al. Reverse surface-polariton Cherenkov radiation[J]. *Sci. Rep.*, 2016, **6** (1): 1–8.
- [47] Duan Zhaoyun., Shapiro M. A., Schamiloglu E., et al. Metamaterial-inspired vacuum electron devices and accelerators [J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2018, **66** (1): 207–218.
- [48] Duan Zhaoyun., Wu B. -I., Xi Sheng, et al. Research progress in reversed Cherenkov radiation in double-negative metamaterials[J]. *Prog. Electromagn Res*, 2009, **90**: 75–87.
- [49] Lu Xueying, Shapiro M. A., Mastovsky I., et al. Generation of high-power, reversed-Cherenkov wakefield radiation in a metamaterial structure [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2019, **122**(1): 014801.
- [50] Hummelt J., Lu X., Xu H., et al. Coherent Cherenkov-cyclotron radiation excited by an electron beam in a metamaterial waveguide[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, **117**(23): 237701.
- [51] Lu Xueying., Picard J. F., Shapiro M. A., et al. Coherent high-power RF wakefield generation by electron bunch trains in a metamaterial structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, **116**(26): 264102.
- [52] Lu Xueying, Shapiro M. A. Temkin R. J. Modeling of the interaction of a volumetric metallic metamaterial structure with a relativistic electron beam[J]. *Phys. Rev. ST – Accel. Beams*, 2015, **18**(8): 081303.
- [53] Wang Xin, Tang Xianfeng, Li Shifeng, et al. Recent advances in metamaterial klystrons[J]. *EPJ Applied Metamaterials*, 2021, **8**: 9.
- [54] Wang Yanshuai, Duan Zhaoyun, Tang Xianfeng, et al. All-metal metamaterial slow-wave structure for high-power sources with high efficiency [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, **107**(15): 153502.
- [55] Wang Xin, Li Shifeng, Zhang Xuanming, et al. Novel S-band metamaterial extended interaction klystron[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2020, **41**(10): 1580–1583.
- [56] Hummelt J. S., Lewis S. M., Shapiro M. A., et al. Design of a metamaterial-based backward-wave oscillator [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, **42**(4): 930–936.
- [57] Liu Fang, Xiao Long, Ye Yu, et al. Integrated Cherenkov radiation emitter eliminating the electron velocity threshold [J]. *Nat. Photonics*, 2017, **11**(5): 289–292.
- [58] Lin Yue-Chai, Liu Fang, Huang Yi-Dong. Cherenkov radiation based on metamaterials [J]. *Acta Physica Sinica.*, (林月钗, 刘仿, 黄翊东. 基于超构材料的 Cherenkov 辐射. *物理学报*), 2020, **69**(15): 56–68.
- [59] Hu Hao, Lin Xiao, Zhang Jingjing, et al. Nonlocality induced Cherenkov threshold [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2020, **14**(10): 2000149.
- [60] Shekhar P., Pendharker S., Sahasrabudhe H., et al. Extreme ultraviolet plasmonics and Cherenkov radiation in silicon[J]. *Optica*, 2018, **5**(12): 1590–1596.
- [61] Feng Xiaodong, Gong Sen, Zhong Renbin, et al. Terahertz radiation in graphene hyperbolic medium excited by an electric dipole [J]. *Opt. Lett.*, 2018, **43** (5) : 1187–1190.
- [62] Zhang Xiaoqiuyan, Hu Min, Zhang Zhuocheng, et al. High-efficiency threshold-less Cherenkov radiation generation by a graphene hyperbolic grating in the terahertz band[J]. *Carbon*, 2021, **183**: 225–231.
- [63] Tao Jin, Wu Lin, Guo Zhengxing, et al. Cherenkov polaronic radiation in a natural hyperbolic material [J], *Carbon*, 2019, **150**: 136–141.
- [64] Qu Tuo, Liu Fang, Lin Yuechai, et al. Cherenkov radiation generated in hexagonal boron nitride using extremely low-energy electrons [J]. *Nanophotonics*, 2020, **9** (6) : 1491–1499.
- [65] Genevet P., Wintz D., Ambrosio A., et al. Controlled steering of Cherenkov surface plasmon wakes with a one-dimensional metamaterial [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2015, **10**(9): 804–809.
- [66] Zhang Yiran, Hu Cheng, Lyu B., et al. Tunable Cherenkov radiation of phonon Polaritons in silver nanowire/hexagonal boron nitride heterostructures [J]. *Nano Lett.*, 2020, **20**(4): 2770–2777.
- [67] Luo Chiyun, Ibanescu M., Johnson S. G., et al. Cherenkov radiation in photonic crystals [J]. *Science*, 2003, **299** (5605): 368–371.
- [68] Lin Xiao, Easo S., Shen Yichen, et al. Controlling Cherenkov angles with resonance transition radiation [J]. *Nature Phys.*, 2018, **14**(8): 816–821.
- [69] Lin Xiao, Hu Hao, Easo S., et al. A Brewster route to Cherenkov detectors. *Nat. Commun.*, 2021, **12**(1): 1–7.
- [70] Shen Yichen, Ye Dexin, Celanovic I., et al. Optical broadband angular selectivity [J]. *Science*, 2014, **343** (6178): 1499–1501.
- [71] Shen Yichen, Hsu C. W., Yeng Y. X., et al. Broadband angular selectivity of light at the nanoscale: Progress, applications, and outlook [J]. *Appl Phys Rev*, 2016, **3**(1): 011103.
- [72] Ginis V., Danckaert J., Veretennicoff I., et al. Controlling Cherenkov radiation with transformation-optical metamaterials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, **113**(16): 167402.
- [73] Hu Hao, Lin Xiao, Wong Liang Jie, et al. Surface Dyakonov-Cherenkov Radiation [J]. *arXiv preprint arXiv*: 2012.09533, 2020.
- [74] Wang Zuoqia, Yao Kan, Chen Min, et al. Manipulating Smith-Purcell emission with babinet metasurfaces [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, **117**(15): 157401.
- [75] Li Lin, Yao Kan, Wang Zuoqia, et al. Harnessing Evanescent Waves by Bi-anisotropic Metasurfaces [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2020, **14**(12): 1900244.
- [76] Jing L., Lin X., Wang Z., et al. Polarization Shaping of Free-Electron Radiation by Gradient Bi-anisotropic Metasurfaces [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2021, **15** (4) : 2000426..

-
- [77] Su Zhaoxian, Cheng Feng, Li Lin, *et al.* Complete control of Smith–Purcell radiation by graphene metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(8): 1947–1954.
 - [78] Jing Liqiao, Wang Zuojia, Lin Xiao, *et al.* Spiral field generation in Smith–Purcell radiation by helical metagratings[J]. *Research*, 2019, 2019.
 - [79] Zhu Juan–Feng, Du Chao–Hai, Zhang Zi–Wen, *et al.* Smith – Purcell radiation from helical grating to generate wideband vortex beams [J]. *Opt. Lett.*, 2021, **46** (18) : 4682–4685.
 - [80] Zhang Zi–Wen, Du Chaohai, Zhu Juan–Feng, *et al.* A Terahertz vortex beam emitter with tunable topological charge and harmonic excitation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2021.
 - [81] Sloan J., Rivera N., Joannopoulos J. D., *et al.* Two photon emission from superluminal and accelerating index perturbations[J]. *arXiv preprint arXiv:2103.09955*, 2021.
 - [82] Dikopoltsev A., Sharabi Y., Lyubarov M., *et al.* Light Emission by Free Electrons in Photonic Time–Crystals[J]. *arXiv preprint arXiv:2109.01203*, 2021.
 - [83] Sharabi Y., Lustig E. Segev M. Disordered Photonic Time Crystals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2021, **126**(16): 163902.
 - [84] Oue D., Ding K. Pendry J. Čerenkov radiation in vacuum from a superluminal grating[J]. *arXiv preprint arXiv:2105.13681*, 2021.
 - [85] Rivera N., Kaminer I., Zhen B., *et al.* Shrinking light to allow forbidden transitions on the atomic scale [J]. *Science*, 2016, **353**(6296): 263–269.
 - [86] Wong Liang Jie, Kaminer I., Ilic O., *et al.* Towards graphene plasmon–based free–electron infrared to X–ray sources[J]. *Nat. Photon.*, 2016, **10**(1): 46–52.
 - [87] Kaminer I., Katan Y. T., Buljan H., *et al.* Efficient plasmonic emission by the quantum Čerenkov effect from hot carriers in graphene [J]. *Nat. Commun.*, 2016, **7**(1) : 1–9.