

专题: 光学超构材料

基于超构材料的 Cherenkov 辐射*

林月钗 刘仿[†] 黄翊东[‡]

(清华大学电子工程系, 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084)

(2020 年 2 月 22 日收到; 2020 年 4 月 7 日收到修改稿)

Cherenkov 辐射 (Cherenkov radiation, CR) 是自由电子速度超过介质中光速时产生的电磁辐射, 其在粒子探测、生物医学、电磁辐射源等领域具有重要的应用价值. 近年来, 人们发现由不同材料和结构组成的超构材料具有新奇的力学、声学 and 光学特性. 电磁波在超构材料中的传播、耦合和辐射可以具有与传统材料完全不同的奇特性质. 将传统真空电子学与微纳光电子学结合, 探索自由电子与超构材料的相互作用, 成为近期不少研究者关注的热点之一. 超构材料的引入打破了传统材料和结构中电磁学规律的限制, 自由电子在其中产生的辐射以及与辐射的相互作用表现出许多新现象和新效应. 本文首先回顾了 CR 的基本概念和辐射原理, 在此基础上介绍了自由电子与双曲超材料、负折射率材料、高 Q 值超材料以及超表面相互作用产生辐射的相关工作, 重点阐述在这些不同功能的超构材料中产生 CR 的机理及其特性, 涉及的工作包括无阈值 CR、反向 CR、受激 CR 以及辐射偏振和相位的调控. 自由电子与各种新型超构材料相互作用的研究和发展, 为实现新型高效的集成化自由电子器件提供了新的途径.

关键词: 超构材料, 自由电子, Cherenkov 辐射, Smith-Purcell 辐射

PACS: 41.60.Bq, 81.05.Xj, 52.59.Rz

DOI: 10.7498/aps.69.20200260

1 引言

超构材料 (metamaterials) 又称超材料, 是一类人工设计的复合材料, 具有传统天然材料所不具备的特殊性质^[1-3], 典型的有双曲超材料^[4,5]、负折射率材料^[6,7]、零折射率材料^[8,9]、以及超表面等^[10,11]. 通过亚波长尺寸下金属和介质材料的几何结构设计, 超构材料可以对电磁波的特性进行调控, 突破传统材料中电磁学规律的限制, 被广泛应用于新型电磁学器件的研制^[3].

自由电子的运动可以产生电磁辐射, 例如同步辐射^[12,13]、回旋辐射^[14,15]、Cherenkov 辐射 (Cherenkov radiation, CR)^[16,17] 和 Smith-Purcell 辐射

(Smith-Purcell radiation, SPR)^[18,19] 等. 其中, CR 是由运动速度超过介质中光相速度的带电粒子所产生的电磁辐射^[20]. 该现象于 1934 年由前苏联物理学家 Cherenkov^[16] 发现, 1937 年前苏联物理学家 Tamm 和 Frank^[21] 对该辐射现象进行理论解释, 因此三人分享了 1958 年的诺贝尔物理学奖. 在 1953 年, 美国物理学家 Purcell 及其学生 Smith^[19] 首次发现自由电子和光栅相互作用会产生辐射, 即 SPR, 其实质上是 CR 的一种表现形式^[22,23]. CR 辐射和带电粒子的特性存在紧密的联系, 它的发现极大地推动了粒子物理学的发展, CR 计数器在反质子、J 粒子和中微子振荡等粒子检测中起到关键作用^[24-26]; 在电真空器件中, CR 效应可应用于信号振荡器、放大器和电子加速器, 在通

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB2200402)、国家自然科学基金 (批准号: 61575104, 61621064)、北京市基金重点项目 (批准号: Z180012)、北京市未来芯片技术高精尖创新中心和北京市量子信息科学研究院资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: liu_fang@tsinghua.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: yidonghuang@tsinghua.edu.cn

信、雷达和电子对抗等领域具有重要应用^[27–30];此外,在生物医学领域,放射性核素衰变过程中伴随的CR现象受到极大关注,基于CR的成像技术可以用于癌症诊断和放射性药物的开发^[31–33].

由于超构材料的新颖人工结构带来的奇特电磁特性^[1–3],自由电子与超构材料之间的相互作用将带来诸多新现象、新效应^[34,35].例如,CR的产生条件将突破传统的限制,辐射频率、辐射效率、辐射偏振等特性将与传统CR有较大的不同.这将极有可能为CR在粒子探测、电磁辐射源、生物医学等领域的应用带来革命性的变化.因此,基于超构材料的CR研究在学术和应用层面都具有重要的价值.本文首先回顾了CR和SPR的基本概念和原理,进而介绍了近年来自由电子借助双曲超材料、负折射率材料、高 Q 值超材料以及超表面产生CR和SPR的有关研究工作,重点阐述了自由电子与这些不同功能的超构材料相互作用产生辐射的机理以及辐射的奇特性质.

2 Cherenkov 辐射的基本概念和原理

CR与真空中变速带电粒子辐射的机制有所不同.变速带电粒子的辐射是粒子本身由于速度的改变而引发的辐射^[36,37],例如电子在磁场中偏转产生的同步辐射^[12,13],或者电子突然减速发出的轫致辐射^[38,39].CR则是由带电粒子与介质相互作用产生,当带电粒子的速度大于介质中的光速时,介质中被诱导的极化分子产生的子波叠加形成的辐射^[17],或认为是电子周围消逝场耦合至介质中形成的辐射.CR的产生对电子的加速、减速和运动轨迹并无要求,辐射的产生取决于带电粒子的速度,它的发现改变了之前人们对匀速带电粒子能否产生电磁辐射的认识^[20,40].图1(a)为自由电子产生CR

的示意图,产生的辐射集中在粒子运动轨迹为轴心的圆锥区域内,辐射方向与粒子运动方向之间的夹角 θ 满足下式关系^[20]:

$$\cos \theta = \frac{c}{nv}, \quad (1)$$

其中 c 为真空光速, v 为自由电子飞行速度, n 为介质的折射率.电子在介质材料中运动产生CR,介质的折射率 n 越大,获得辐射所需要的电子能量越小,满足大于介质中光速的阈值条件为^[17,41]

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

除了介质材料中的CR,自由电子经过光栅表面也可以产生电磁辐射,即SPR.其过程可以理解成自由电子和光栅表面的镜像电荷组成电偶极子,由偶极子振荡产生电磁辐射^[42–44].图1(b)是SPR示意图,其辐射公式如下^[19,45]:

$$\lambda = \frac{L}{m} \left(\frac{c}{v} - \cos \theta \right), \quad (3)$$

其中 λ 为辐射波长, L 为光栅周期, θ 为辐射角度, m 为辐射的阶次.可见,不同角度SPR的辐射频率不同,在频谱上呈现的是宽谱辐射输出.

除了从偶极子辐射的角度理解CR和SPR,还可以从自由电子周围消逝场耦合到传播场的角度进行分析.真空中匀速运动的电子周围存在着宽谱的消逝场,电磁场频率 ω 和电子飞行方向波矢 β 呈线性关系^[46]:

$$\omega = \beta \cdot v. \quad (4)$$

无论是介质材料中的CR,还是基于光栅结构的SPR,原理上都是将自由电子周围的消逝场转化成向外传播的电磁辐射^[44,47].因此,SPR本质上就是CR的一种表现形式^[22,23].

借助精巧的几何结构设计,超构材料可以满足自由电子辐射所需的慢波条件,同时与电子之间的

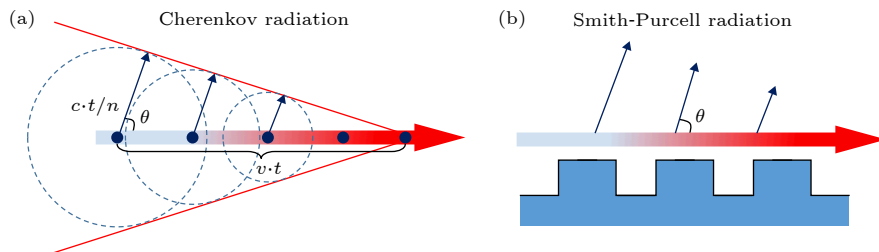


图1 (a) CR示意图,自由电子在介质中飞行,电子速度 v 大于介质中的光速 c/n ^[20]; (b) SPR示意图,电子周围消逝场经光栅散射成为自由空间的辐射^[45]

Fig. 1. (a) Schematic of CR. An electron passes through a dielectric medium at a speed (v) greater than the phase velocity of light (c/n)^[20]; (b) schematic of SPR. The evanescent field surrounding the electron is scattered into free space by a periodic grating^[45].

作用中展现出许多独特的电磁辐射现象和特性. 下面对不同功能的超构材料与自由电子相互作用的研究工作及其辐射机理进行阐述.

3 基于双曲超材料的无阈值 Cherenkov 辐射

在传统的各向同性介质材料中, 产生 CR 的条件如 (2) 式所示, 即自由电子的速度超过介质中光的相速. 葡萄牙里斯本大学 Silveirinha^[48] 利用等频率波矢图对 CR 阈值条件进行解释, 如图 2(a) 所示, 各向同性介质的等频率波矢图为黄色圆形, 电子速度 v 必须足够大, 使得电子周围消逝场的波数 β (绿色虚线箭头) 处于“圆形”区域内, 进而满足与介质中 CR 的波矢匹配关系, 自由电子周围消逝场可以耦合到介质中产生 CR. 若电子能量低于阈值 c/n , 电子周围波数由图中红色箭头所示, 此时无法产生辐射.

清华大学刘仿等^[49] 研究了基于双曲超材料的片上无阈值的 CR, 突破了传统介质中需要极高电子能量产生 CR 的限制. 双曲超材料是一种各向异性的人工复合材料, 其色散关系为^[4,5]

$$\frac{k_x^2}{\varepsilon_x} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_z} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2. \quad (5)$$

其中 ε_x 和 ε_z 是超构材料分别沿着 x 和 z 方向的等效介电常数. 由于 ε_x 和 ε_z 的介电常数实部符号相反, 双曲超材料的等频率波矢图为开放的双曲线型. 根据等频率波矢图的形状 (由不同方向正负介电常数决定), 可以分成第 I 类 ($\varepsilon_x < 0, \varepsilon_z > 0$) 和

第 II 类 ($\varepsilon_x > 0, \varepsilon_z < 0$) 双曲超材料^[50]. 在实验中利用 Au 和 SiO₂ 的多层膜构建了光学波段的第 II 类双曲超材料, 双曲线开口方向沿波矢 k_z 方向, 如图 2(b) 黄色曲线所示.

在双曲超材料中, 理论上电磁模式的波矢可以无限大, 低能量电子周围极大波矢的消逝场 (对应图 2(b) 红色箭头) 可以耦合至双曲超材料中产生 CR, 反而高能量的电子无法产生 CR (对应图 2(b) 绿色箭头). 因此, 利用双曲超材料可以消除产生 CR 的最低电子速度 (能量) 阈值, 即实现无阈值 CR. 自由电子在双曲超材料中产生 CR 的条件为^[49]

$$\begin{cases} v < \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_x}}, \\ \varepsilon_z < 0. \end{cases} \quad (6)$$

根据 (6) 式可知, 无论多低能量的自由电子都可以在双曲超材料中产生 CR. 与传统介质中产生 CR 存在电子速度 (能量) 下限不同, 第 II 类双曲超材料中产生 CR 反而存在一定的电子速度 (能量) 上限.

图 3(a) 所示为集成 CR 辐射芯片的示意图和电子显微镜照片. 仿真结果表明, 当电子能量仅为 0.1 keV 时, 仍可以在多层膜构建的双曲超材料中产生 CR, 如图 3(b) 所示. 实验中, 由钼 (Mo) 平面电子源发射的自由电子沿超材料表面飞行, 在超材料中产生 CR, 再被金属纳米周期狭缝耦合到自由空间中进行探测. 这里产生 CR 的电子能量仅为 0.25—1.4 keV (图 3(c)), 比其他方法所需的电子能量降低了 2—3 个数量级^[19,51,52]. 测得的辐射波长覆盖 500—900 nm (图 3(d)).

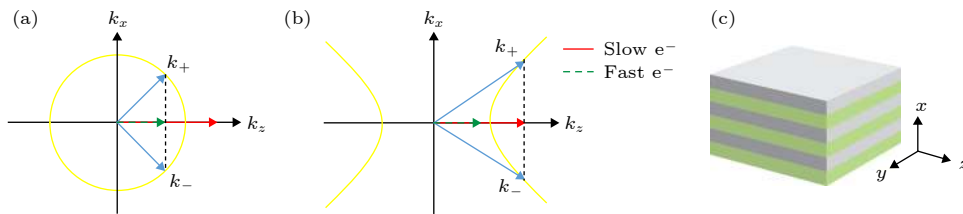


图 2 (a) 自由电子在各向同性材料中产生 CR 的波矢匹配图, 速度较快的电子对应较短的波矢 (绿色虚线箭头), 与光子态 k_+ 和 k_- 满足 z 方向波矢匹配, 可以激励 CR; 而速度较小的电子周围消逝场 (红色箭头) 不存在与之匹配的光子态, 无法产生 CR; (b) 自由电子在双曲超材料中产生 CR 的波矢匹配图, 慢速的电子 (红色箭头) 可以产生 CR; (c) 由金属和介质多层膜构成的双曲超材料; 引自文献^[48], 重新定义了 (a), (b) 图中的 k_x 轴和 k_y 轴的方向, 并在 (c) 图中标出了坐标轴

Fig. 2. (a) Diagram of wave-vector matching for CR generation in the isotropic material. Fast electrons (e^-) (dashed green arrow) can satisfy the wave-vector matching condition with two photonic states k_+ and k_- in the considered plane, and thereby emit CR. In contrast, slow electrons (solid red arrow) can not excite photonic states to satisfy the matching condition; (b) diagram of wave-vector matching for CR generation in the hyperbolic metamaterial. Slow electrons (solid red arrow) can emit CR; (c) hyperbolic metamaterial formed by a stack of metal and dielectric slabs. Reproduced from Ref. ^[48] with k_x and k_y redefined in (a), (b) and the coordinates marked in (c).

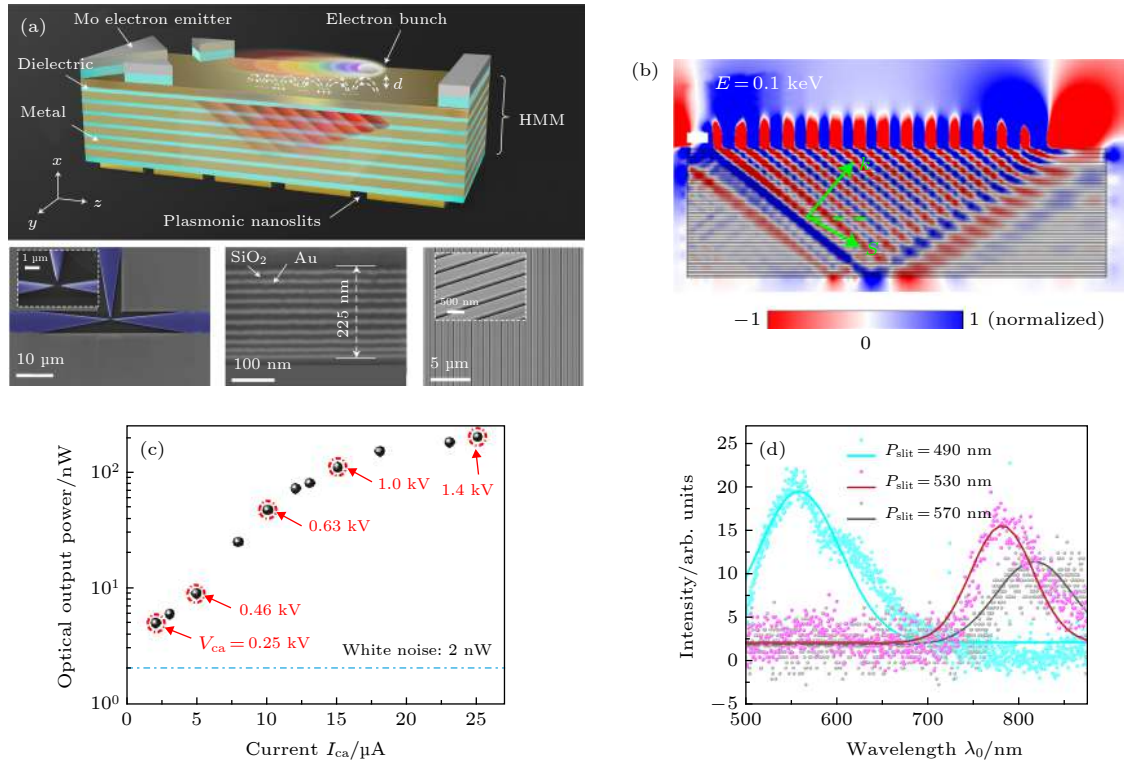


图 3 (a) 集成 CR 芯片示意图和电子显微镜照片, 器件上表面为钼平面电子发射源, 中间为由 Au 和 SiO₂ 多层膜组成的双曲超材料, 下方为周期金属纳米狭缝用于将 CR 耦合到自由空间; (b) 能量为 0.1 keV 的自由电子在多层膜双曲超材料中产生 CR (电场 E_z 分量) 的仿真结果, 场图对应真空波长为 800 nm; (c) 阴阳极电压 V_{ca} 为 0.25—1.4 kV 时, 芯片辐射输出功率; (d) 不同纳米缝隙周期 P_{slit} 对应的输出光谱; 引自文献 [49]

Fig. 3. (a) Schematic of the integrated CR emitter and scanning electron microscopy images. The planar Mo electrodes is on the top surface of the emitter. The hyperbolic metamaterial in the middle is formed by alternating Au and SiO₂ films. The plasmonic nanoslits under the emitter are used to couple the CR in the hyperbolic metamaterial to free space; (b) numerical simulation of CR (electric field E_z) with electron energy of 0.1 keV when $\lambda_0 = 800$ nm; (c) optical output power of the chip with cathode-anode voltage V_{ca} varying from 0.25 to 1.4 kV; (d) spectra of output light with different plasmonic nanoslit period of P_{slit} . Extracted from Ref. [49].

由于 Au 的表面等离子体 (surface plasmon, SP) 共振频率处于可见光和近红外波段, Au-SiO₂ 多层膜结构的双曲区间为可见光和近红外波段 [53]. 如果要在其他波段获得双曲超材料中的 CR, 需要选取不同等离子体频率的材料来实现超构材料. 几种不同材料的 SP 共振频率如图 4(a) 所示 [53], 加拿大阿尔伯塔大学 Shekhar 等 [53] 为了拓展紫外波段的 CR, 对 Si 材料的等离子体特性进行了研究. 通过电子能量损失谱测得 Si 膜的 SP 频率约为 11.5 eV (对应真空波长 107 nm), 处于极紫外波段, 如图 4(c) 所示. 进而他们提出利用 Si 和 SiO₂ 的多层膜构造双曲超材料, 并仿真了低能量电子激励的极紫外波段 CR.

值得注意的是, 金属-介质多层膜结构中的膜层厚度在远小于 CR 的波长 (即满足亚波长条件) 时, 多层膜才能被视为均匀的电磁媒质 [48]. 由色散公式 (4) 可知, 随着电子速度 (能量) 的降低,

电子周围消逝场波矢增大, 双曲超材料中的 CR 波长将缩短. 受限于薄膜制备工艺, 当 CR 波长进一步缩短 (电子速度进一步降低) 时, 要满足亚波长条件的膜层厚度将难以实现 [54,55]. 因此, 实际的双曲超材料中仍然存在一个产生 CR 的电子速度 (能量) 的最小值, 特定厚度的金属-介质多层膜结构只能支持一定范围的电磁波矢, 对应激励 CR 的电子能量的范围.

有趣的是各向异性材料中的 *h*-BN 和 Bi₂Te₃ 等材料, 它们的二维层状结构类似于超构材料的多层膜, 使其天然具有双曲特性 [56–58], 并且不少科研人员已经从理论和实验中证实了天然双曲特性可以用于产生 CR [59–62]. 由于 *h*-BN 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和更小的激励 CR 的电子能量, 理论预测电子能量可以进一步降低到 ~1 eV 的量级 [60]. 但由于电子能量过小, 导致 *h*-BN 中 CR 信号的提

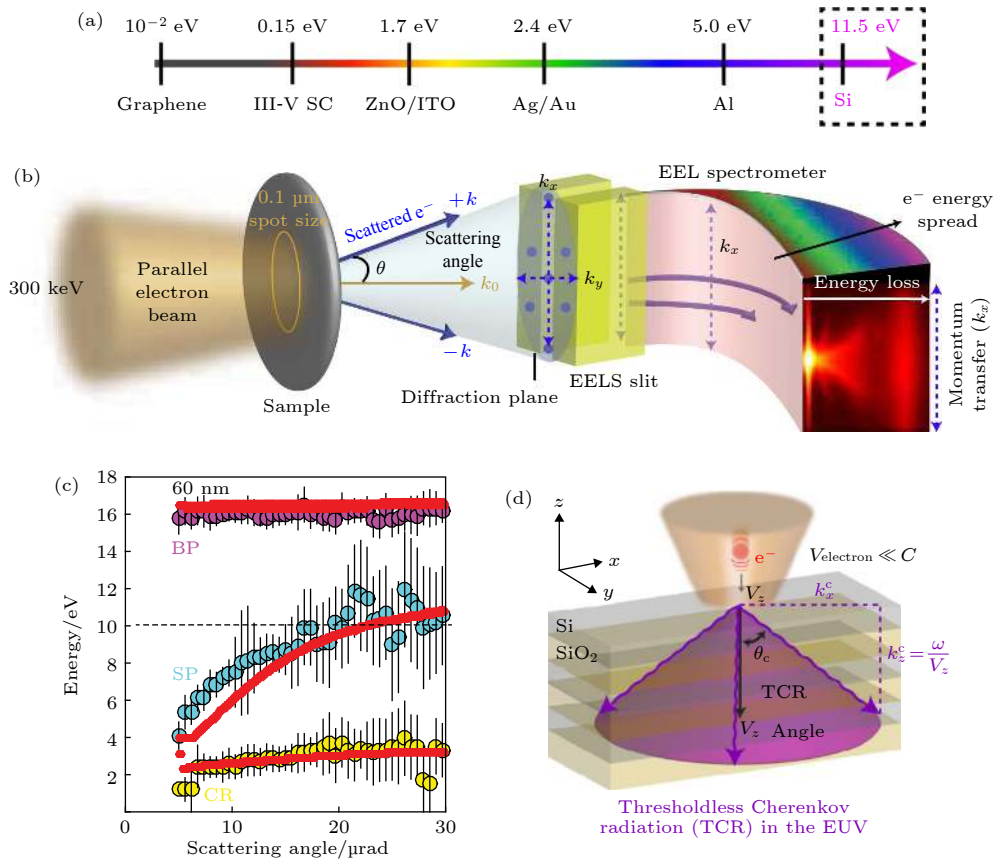


图 4 (a) 从太赫兹到极紫外 (extreme ultraviolet, EUV) 的范围内, 不同材料的 SP 共振频率; (b) 电子能量损失谱 (electron energy-loss spectroscopy, k-EELS) 测量 Si 膜的光子能带的示意图; (c) 60 nm 厚 Si 膜的光子能带结构测量结果, Si 的 SP 共振频率约为 11.5 eV, 处于 EUV 波段; (d) EUV 波段的无阈值 CR 的示意图, 双曲超材料由 Si 和 SiO₂ 多层膜组成; 引自文献 [53]

Fig. 4. (a) Measured surface plasmon resonance for various materials across the electromagnetic spectrum from terahertz to EUV; (b) schematic showing the k -EELS technique for measuring the photonic band structure of silicon; (c) the photonic band structure of 60 nm thick silicon films. It shows evidence of the SP of silicon in the EUV; (d) schematic of thresholdless CR in the EUV excited in a hyperbolic metamaterial composed of Si and SiO₂ multilayer stack. Extracted from Ref. [53].

取和探测存在极大的难度, 因此还未在实验中获得验证. 由上述研究工作可以看到, 双曲材料的引入为低能量自由电子激励不同频段的电磁辐射提供了可能, 有助于真空电子辐射器件的小型化和集成化.

4 基于负折射率材料的反向 Cherenkov 辐射

除了双曲超材料, 负折射率材料特殊的电磁学特性也受到广泛关注. 在各向同性介质中, 电场 E 、磁场 H 和波矢 k 满足右手定则, 波矢和能量传播方向相同. 通过对超构材料的单元结构设计, 使得材料的电导率和磁导率同时为负, 电磁波矢量方向与能量传播方向相反, E 、 H 和 k 则满足左手定则, 所以负折射率材料也被称为左手材料 [63–65]. 前

苏联物理学家 Veselago [64] 最早提出负折射率材料的概念, 并预言了负折射率材料中可能存在的电磁效应, 包括电磁波的负折射率效应、反向多普勒 (Doppler) 效应和反向 CR.

目前已经实现了多种具有负折射率功能的超构材料, 其核心原理在于通过结构设计使超构材料的磁导率和电导率同时小于零 [66–68]. 浙江大学奚圣等首次在实验上探索了负折射率材料的反向 CR [68], 实验示意图如图 5(a) 所示 [69]. 其中, 正交的金属条提供负电导率, L 形金属条构成的开环谐振器提供负磁导率, 整体上组成了在 8.1–9.5 GHz 之间具有负折射率特性的超构材料. 为了提高电磁辐射强度以便于信号的探测, 实验中用特定频率的天线阵列取代飞行的带电粒子. 图 5(c) 是不同角度辐射功率的测试结果, 说明了 CR 与“粒子飞行”方向相反. 加州伯克利大学 Zhang 等 [69] 在对该工

作的评述中谈及, 用天线阵列取代带电粒子, 其结果本质上体现的是负折射率现象, 要想在实验中直接验证反向 CR, 仍需要通过带电粒子和负折射率材料的直接作用.

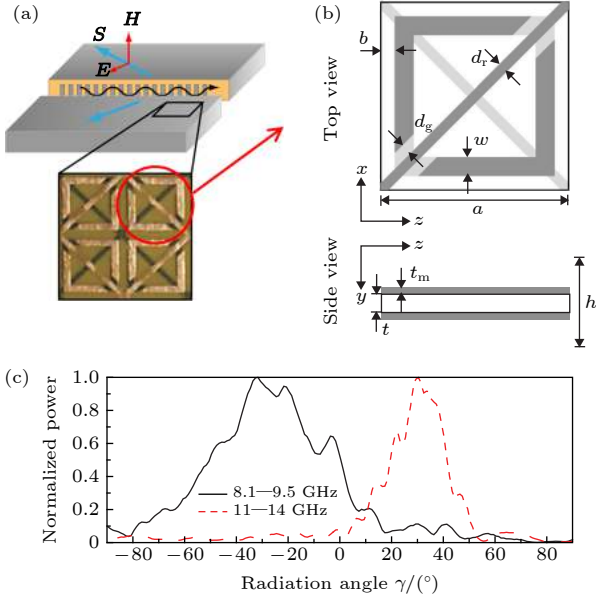


图 5 (a) 反向 CR 的实验示意图以及负折射率材料的照片; (b) 负折射率材料结构单元的顶视和侧视示意图; (c) 在负折射率 (实线) 和正折射率 (虚线) 区间, 辐射功率随角度变化的功率谱; (a) 图引自文献 [69], (b), (c) 图引自文献 [68]

Fig. 5. (a) Schematic of the experimental configuration used to demonstrate backward CR and the photographic image of the negative index metamaterials; (b) the top and side view of the negative index metamaterials; (c) spectra of the radiation power in each angle in the negative band (solid line) and positive band (dashed line). (a) is extracted from Ref. [69]. (b), (c) are extracted from Ref. [68].

随后, 电子科技大学段兆云等 [70] 在负折射率材料中首次观测到带电粒子激励的反向 CR. 如图 6(a) 所示, 负折射率材料的器件模型为金属波导内部加载互补开口谐振环. 基于有效媒质理论和数值仿真计算, 图 6(b) 中自由电子和超构材料色散曲线的交点对应激励起负群速度的电磁辐射, 即 CR 传播方向与电子运动方向相反. 实验测试频率范围为 2.83—3.05 GHz 微波波段, 自由电子沿 +z 方向从器件左侧飞往右侧, 测试结果发现位于左侧的端口 2 比右侧的端口 1 的辐射输出高 17.6 dB. 这意味着辐射的能流方向与电子飞行方向相反, 验证了自由电子在负折射率材料中反向 CR 特性.

在粒子物理学中, CR 可以用来检测带电粒子

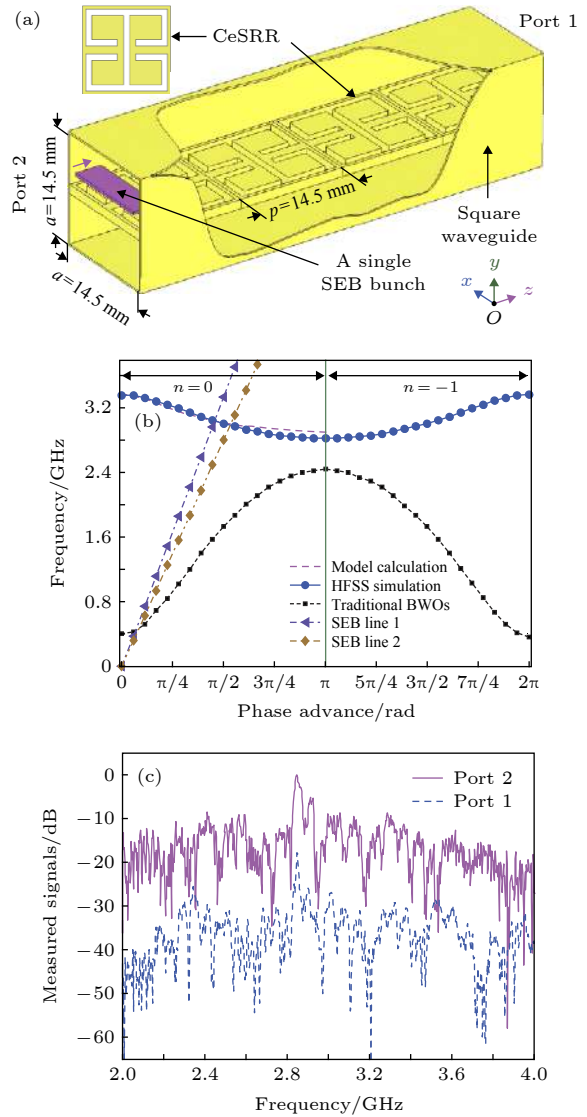


图 6 (a) 反向 CR 器件构造图, 电子束沿 +z 方向飞行与器件相互作用; (b) 自由电子和反向 CR 器件的色散曲线, 负折射率材料的色散曲线通过模型计算和高频结构仿真软件 (HFSS) 仿真得到; (c) 在端口 2 和端口 1 测试反向 CR 器件的功率谱分布; 引自文献 [70], 并在 (a) 中标记了位于左侧的“Port 2”和右侧的“Port 1”

Fig. 6. (a) Schematic diagram of the constructed structure interacting with a single sheet electron beam bunch traveling along the +z direction; (b) dispersion curves characterized by frequency versus phase advance. The dispersion curve of the negative metamaterial is obtained by model calculation and high frequency structure simulator (HFSS) simulation; (c) measured power spectral densities of the reversed Cherenkov radiation and its reflection signals at ports 2 and 1. Extracted from Ref. [70] with “Ports 2” and “Port 1” marked in (a).

的速度、动能以及电荷量等参数 [71–73]. 但是传统 CR 的传播和粒子速度同向, 不可避免地会给信号探测带来干扰 [74]. 负折射率材料可以用一种新的方式调控自由电子的辐射角, CR 方向与电子飞行

方向呈现大于 90° 的钝角关系. 基于负折射率材料的反向 CR 可以有效分离粒子和辐射信号, 从而减小粒子检测器的干扰, 提高探测灵敏度 [74,75].

5 基于高 Q 值超构材料的受激 Cherenkov 辐射

超构材料的引入为自由电子辐射源的小型化提供了可能, 而高 Q 值的超构材料可以进一步提高自由电子和周围辐射场之间的相互作用, 极大增强电子辐射效率以及相干性 [76–79], 有望获得片上集成的自由电子激光器.

韩国首尔大学 Kim 等 [77] 在实验中实现了微波波段具有高 Q 值 Fano 共振特性的金属超构材料. 图 7(a) 和图 7(b) 是两种非对称结构的超构材料示意图, 材料结构由金属狭缝构成, 非对称的结构设计使得超构材料的透射谱存在 Fano 共振, 对应的 Q 值可以达到 700 左右. 正是借助高 Q 值的 Fano 共振, 他们在理论上研究了自由电子和超构材料的相互作用可以实现受激 CR. 仿真所用的电子能量为 10.43 keV, 电流密度 2 A/cm^2 , 电子束在超构材料表面发生群聚, 产生频率为 34.3 GHz 的受激辐射.

麻省理工学院 Yang 等 [79] 则提出利用光子连续区束缚态 (bound states in the continuum, BICs) 增强 SPR 强度. 光学 BIC 的频率处于“辐射连续区域”内, 却仍能被束缚在周期结构中, 并表现出超高的品质因子 Q [76,80,81]. 该工作通过设计 Si 光栅周期结构, 使得与电子相位匹配的模式处于 BIC 态. 借助 BIC 的高 Q 值, 同时得益于 Si 光栅的低介质损耗, 自由电子的 SPR 辐射强度增强约 3 个数量级. 复旦大学胡新华课题组 [78] 的工作中, 进一步阐述了基于 Si 的双排光栅结构相比于单排光栅结构可以提高 BIC 的 Q 值. 图 8(e) 所示模拟仿真结果表明, 通过调整双排 Si 介质光栅之间的距离, 理论上可以实现极大的 Q 值, 与自由电子之间的强相互作用为小型化的 CR 激光奠定了理论基础.

上述工作都提到了超构材料的受激 CR, 其受激放大过程是电磁辐射与自由电子实现能量交互的正反馈过程 [82–84]. 在一定情况下, 自由电子和电磁辐射之间存在极强的相互作用, 电子束流受到电磁辐射的调制形成周期性群聚电子团 [85–87], 群聚电子周围消逝场的相干性增强 [85], 产生频谱更窄、强度更高的辐射, 最终实现受激辐射.

无论是 Fano 共振还是光子 BIC 态, 目的都是

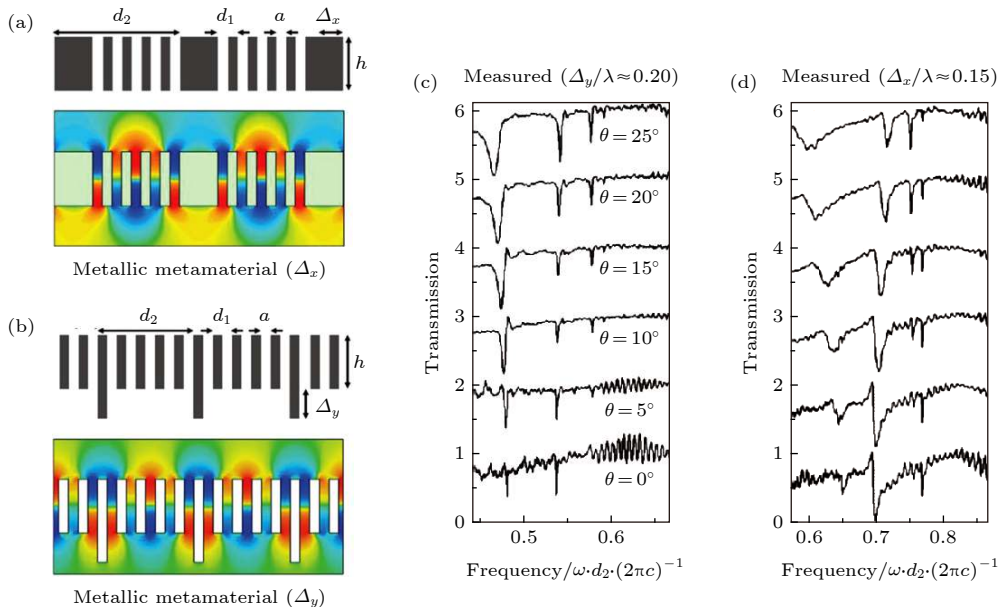


图 7 (a) 和 (b) 是两种非对称结构的 Fano 共振金属超构材料, 超构材料由亚波长的金属狭缝构成; (c) 和 (d) 是不同入射角度下, 两种非对称结构的透射谱结果, 透射谱中的四个低峰表示 p 偏振光激励的 Fano 共振; 引自文献 [77]

Fig. 7. (a), (b) Fano-enhanced metallic metamaterials consisting of subwavelength slits with two different structural asymmetries; (c), (d) transmission results with different angles of incidence and structural asymmetries. The four sharp dips represent the excitation of the Fano resonance by capturing the p-polarized incident wave. Extracted from Ref. [77].

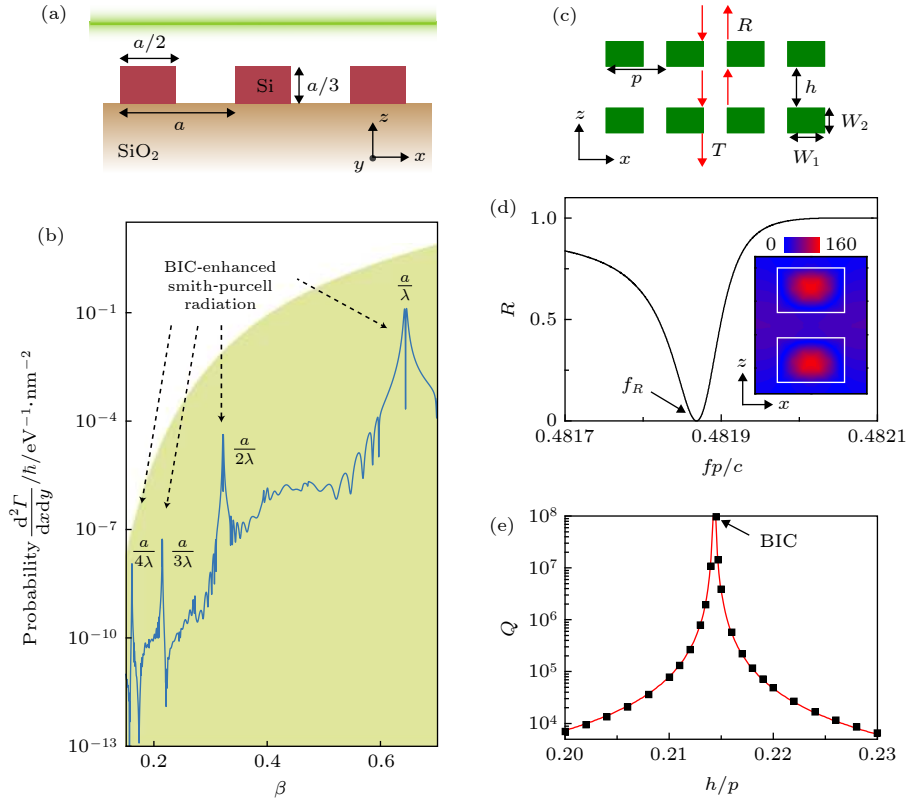


图 8 (a) 自由电子飞过 Si 周期光栅的示意图; (b) 在给定频率下不同电子速度的辐射强度, BIC 附近的 SPR 得到极大增强; (c) 平面波入射双排 Si 介质光栅示意图; (d) 归一化频率下介质光栅的反射系数 R , 插图共振频率处 $|H_y|$ 场图; (e) 共振频率 f_R 的品质因子 Q 随光栅间距 h 的变化关系; (a), (b) 图引自文献 [79]; (c)–(e) 图引自文献 [78]

Fig. 8. (a) Schematic of free electrons flying over a silicon-on-insulator grating; (b) emission probability at a given frequency for different electron velocities, and strongly enhanced SPR near the BIC; (c) schematic of the normal impinging of a propagating plane wave upon a double silicon grating; (d) specular reflection coefficient R as a function of normalized frequency. Inset: the profile of $|H_y|$ at resonant frequency. (e) Q factor at f_R as a function of the distance h . (a), (b) are extracted from Ref. [79]. (c)–(e) are extracted from Ref. [78].

想借助高 Q 值结构实现特定频率的电磁辐射与自由电子的强相互作用。然而, 为了在微纳尺度精准控制电子束斑以及与超构材料之间的作用距离, 电子束流通常较低而导致辐射太弱, 不足以反馈调制自由电子而形成足够的增益 [88]。因此, 利用高 Q 值低损耗的结构来实现集成化的自由电子激光器极具其具有探索意义和挑战性。

6 基于超表面的自由电子辐射调控

超表面是一种二维平面化的超构材料, 其厚度远小于器件的工作波长 [89]。与超构材料类似, 超表面以其灵活的结构设计对电磁波的振幅、偏振和相位等参量进行调控 [89–91]。自由电子和超表面的作用, 可以看作是超表面的周期结构对电子周围消逝场的散射 [92], 产生的辐射即 SPR, 第 2 节所述其本质上是 CR 的一种形式 [22,23]。

基于传统周期结构的 SPR 为 TM 极化辐射, 美国东北大学 Wang 等 [93] 用如图 9(a) 所示的金属 C 形孔谐振器设计的超表面来调控 SPR 的极化特性。在传统的 C 形环谐振器中, 自由电子激励起的是平面内的电偶极子和垂直于平面的磁偶极子 (图 9(c)), 导致辐射场的偏振为不可调控的 TM 极化。基于 Babinet 原理, C 形孔 (图 9(b)) 与 C 形环谐振器为互补结构, 自由电子在互补结构中首先激励起垂直于平面的电偶极子, 电偶极子会在 C 形孔谐振器内耦合产生平面内的磁偶极子。磁偶极子的方向与 C 形孔的开口方向相关, 当开口方向 $\alpha = 0^\circ$, 磁偶极子垂直于电子飞行方向, SPR 为 TM 极化场; 当 $\alpha = 90^\circ$, 磁偶极子平行于电子飞行方向, 对应为 TE 极化场。通过 C 形孔谐振器超表面, SPR 偏振态突破了传统 TM 的限制。基于上述的理论研究工作, 麻省理工学院 Yang 等 [94] 在实验中利用 C 形光学天线产生 SPR, 并实现对光

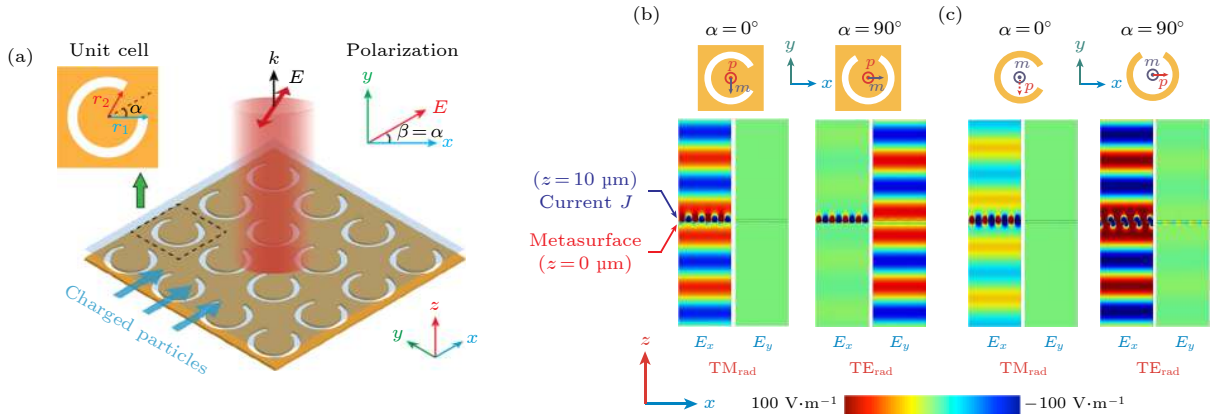


图 9 (a) 自由电子和 Babinet 超表面作用产生 SPR 的示意图, 均匀带电粒子在超表面上方沿 $+x$ 轴方向飞行; (b) 和 (c) 分别是 C 形孔结构和环结构的超表面, 以及自由电子产生 SPR 的电场分布模拟结果; 引自文献 [93]

Fig. 9. (a) Schematic of the SPR produced by the interaction of free electrons and a Babinet metasurface. The uniform sheet of free electrons moves closely parallel to the metasurface along the $+x$ axis; (b), (c) the structures of C-aperture and C-ring metasurfaces, and the electric field distributions of SPR generated via the interaction with free electrons. Extracted from Ref. [93].

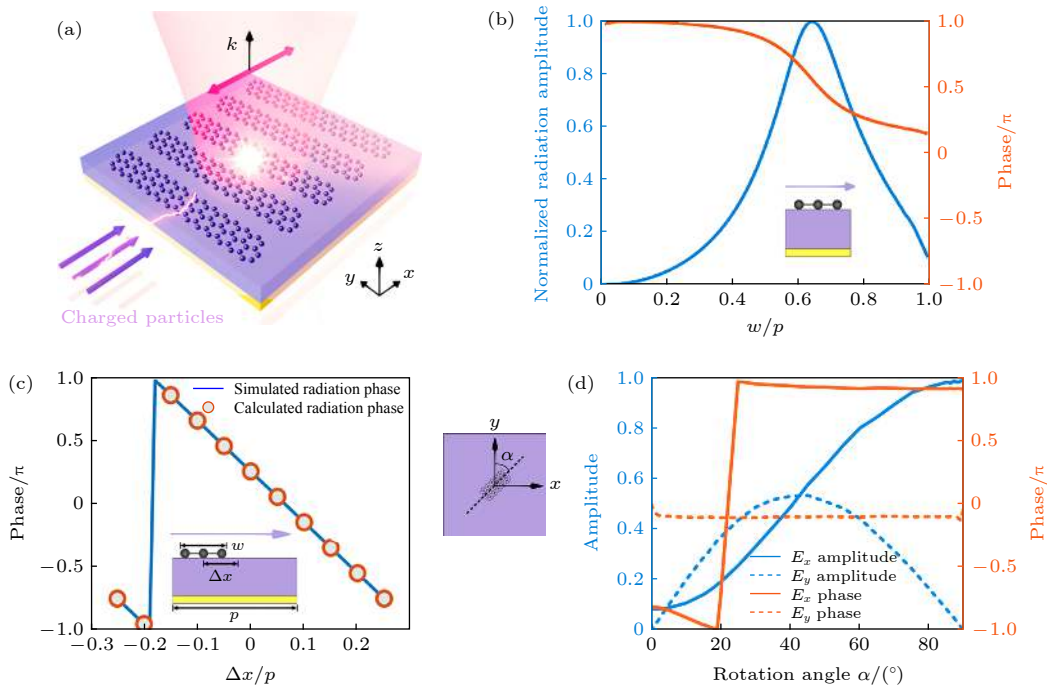


图 10 (a) 基于石墨烯超表面产生 SPR 的示意图; (b) SPR 辐射强度、相位与石墨烯带状结构宽度 w 的关系; (c) SPR 二阶辐射相位与石墨烯在单位结构中位置 Δx 的关系; (d) SPR 的 E_x 和 E_y 分量的强度和相位与石墨烯的旋转角度 α 之间的关系; 引自文献 [95]

Fig. 10. (a) Schematic of SPR mediated by graphene metasurfaces; (b) dependence of the SPR amplitude and phase on the width of the graphene ribbons; (c) dependence of the SPR phase on the displacement of a graphene ribbon in its unit cell for the second-order SPR; (d) dependence of the amplitude and phase of electric field E_x and E_y on the rotating angle of rectangular graphene patches. Extracted from Ref. [95].

学波段 SPR 的偏振调控.

除了对 SPR 偏振特性的调控, 美国东北大学 Su 等 [95] 提出利用石墨烯超表面对辐射场进行相位、振幅以及偏振态的控制. 石墨烯的超表面模型如图 10(a) 所示, 从上到下分别为石墨烯带状结构、介质层以及金属反射层, 自由电子在石墨烯带

状结构表面飞行激励 SPR. 由于石墨烯结构的等离子体共振, 通过改变石墨烯的宽度 w 可以实现 SPR 归一化强度从 0 到 1 的控制 (图 10(b)); 同时, 辐射的相位与石墨烯所在单元结构中的位置 Δx 相关, 调整石墨烯的位置可以调控 SPR 二阶辐射的相位在 $-\pi$ 至 $+\pi$ 范围内变化 (图 10(c)); 此外

改变自由电子和石墨烯相互作用的角度 α , 辐射场偏振特性可以被调控, E_x 和 E_y 分量的强度和相位随着 α 不同而改变 (图 10(d)), 以此实现不同偏振态的 SPR.

7 总结与展望

超构材料新颖的几何结构设计引入了独特的电磁特性, 为突破自由电子产生 CR 的限制条件、调控 CR 的辐射特性和实现全新自由电子辐射器件提供了可能, 成为近年来人们关注的研究热点之一. 本文介绍了一些具有代表性的基于超构材料产生 CR 的研究工作, 重点讨论了双曲超材料中无阈值 CR、借助负折射率材料的反向 CR、基于高 Q 值超材料的受激 CR、以及超表面调控 SPR 辐射的物理机制和新奇辐射特性.

本文只是回顾了这一研究方向上的初步研究工作, 超构材料在发展过程中还会不断地融合新的材料和结构, 仍有许多电子辐射的新现象、新机理和新特性有待挖掘. 可以期待, 超构材料的引入将提升现有器件的性能, 并获得多种新型的自由电子器件. 例如, 现有电真空器件工作频率处于微波波段, 随着频率提高到太赫兹波段, 辐射功率显著下降. 借助电磁谐振结构、二维材料、表面等离子激元模式、以及微加工技术^[28,96–99], 构建太赫兹波段的超构材料, 有可能获得高频太赫兹电真空器件. 目前, 超短波长、集成化自由电子辐射光源也是国内外研究热点, 片上集成的自由电子受激辐射源还局限在理论探索. 基于高功率激光和超构材料的电子加速、群聚以及运动轨迹的调制获得关注和发展^[100–103], 为新型的自由电子激光器提供了可能. 此外, 尽管之前的工作初步探索了半导体异质结的二维电子气或石墨烯薄膜的准自由电子的辐射^[104–107], 但是固态材料中的准自由电子能否像真空自由电子一样产生 CR 仍然是一个有待研究的问题. 有趣的是, CR 的概念还被引入到非线性光学领域, 用高能激光代替带电粒子, 产生诸如光学超晶格中的非线性 CR^[108–111], 以及基于孤子 CR 的光频梳现象等^[112–114], 这些现象有助于新型光电子学器件的研发, 拓展了 CR 的应用领域.

传统真空电子学与正在新兴的微纳光电子学的交叉融合, 为突破自由电子产生辐射的限制条件、拓展辐射频率、调控辐射偏振和相位、操控自

由电子的能量和空间分布、以及实现全新形式的自由电子辐射和加速器件提供了可能. 期待更多创新工作的涌现, 推动这一交叉学科的发展.

参考文献

- [1] Engheta N, Ziolkowski R W 2006 *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations* (Hoboken: John Wiley & Sons) pp5–9
- [2] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [3] Zheludev N I, Kivshar Y S 2012 *Nat. Mater.* **11** 917
- [4] Poddubny A, Iorsh I, Belov P, Kivshar Y 2013 *Nat. Photonics* **7** 948
- [5] Shekhar P, Atkinson J, Jacob Z 2014 *Nano Converg.* **1** 14
- [6] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, Ulin-Avila E, Genov D A, Bartal G, Zhang X 2008 *Nature* **455** 376
- [7] Smith D R, Kroll N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2933
- [8] Vesseur E J R, Coenen T, Caglayan H, Engheta N, Polman A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 013902
- [9] Moitra P, Yang Y, Anderson Z, Kravchenko I I, Briggs D P, Valentine J 2013 *Nat. Photonics* **7** 791
- [10] Lin D, Fan P, Hasman E, Brongersma M L 2014 *Science* **345** 298
- [11] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J-P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [12] Elder F R, Gurewitsch A M, Langmuir R V, Pollock H C 1947 *Phys. Rev.* **71** 829
- [13] Hendrickson W A 1991 *Science* **254** 51
- [14] Asner D M, Bradley R F, de Viveiros L, Doe P J, Fernandes J L, Fertl M, Finn E C, Formaggio J A, Furse D, Jones A M, Kofron J N, LaRoque B H, Leber M, McBride E L, Miller M L, Mohanmurthy P, Monreal B, Oblath N S, Robertson R G H, Rosenberg L J, Rybka G, Rysewyk D, Sternberg M G, Tedeschi J R, Thümmel T, VanDevender B A, Woods N L 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 162501
- [15] Bornatici M, Cano R, De Barbieri O, Engelmann F 1983 *Nucl. Fusion* **23** 1153
- [16] Cherenkov P A 1934 *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **2** 451
- [17] Kobzev A P 2010 *Phys. Part. Nucl.* **41** 452
- [18] Doucas G, Mulvey J H, Omori M, Walsh J, Kimmitt M F 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 1761
- [19] Smith S J, Purcell E M 1953 *Phys. Rev.* **92** 1069
- [20] Bolotovskii B M 2009 *Phys. Usp.* **52** 1099
- [21] Frank I M, Tamm I E 1991 *Selected Papers* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg) pp29–35
- [22] Eichmeier J A, Thumm M 2008 *Vacuum Electronics: Components and Devices* (Berlin: Springer Science & Business Media) p315
- [23] Ren H, Deng X, Zheng Y, An N, Chen X 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 223901
- [24] Aubert J J, Becker U, Biggs P J, Burger J, Chen M, Everhart G, Goldhagen P, Leong J, McCorriston T, Rhoades T G, Rohde M, Ting S C C, Wu S L, Lee Y Y 1974 *Phys. Rev. Lett.* **33** 1404
- [25] Chamberlain O, Segrè E, Wiegand C, Ypsilantis T 1955 *Phys. Rev.* **100** 947
- [26] Fukuda Y, Hayakawa T, Ichihara E, Inoue K, Ishihara K, Ishino H, Itow Y, Kajita T, Kameda J, Kasuga S 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 1562
- [27] Bugaev S P, Cherepenin V A, Kanavets V I, Klimov A I,

- Kopenkin A D, Koshelev V I, Popov V A, Slepkov A I 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 525
- [28] Duan Z, Shapiro M A, Schamiloglu E, Behdad N, Gong Y, Booske J H, Basu B N, Temkin R J 2019 *IEEE Trans. Electron Devices* **66** 207
- [29] Korovin S D, Eltchaninov A A, Rostov V V, Shpak V G, Yalandin M I, Ginzburg N S, Sergeev A S, Zotova I V 2006 *Phys. Rev. E* **74** 016501
- [30] Saltzberg D, Gorham P, Walz D, Field C, Iverson R, Odian A, Resch G, Schoessow P, Williams D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 2802
- [31] Kotagiri N, Sudlow G P, Akers W J, Achilefu S 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 370
- [32] Robertson R, Germanos M S, Li C, Mitchell G S, Cherry S R, Silva M D 2009 *Phys. Med. Biol.* **54** N355
- [33] Ruggiero A, Holland J P, Lewis J S, Grimm J 2010 *J. Nucl. Med.* **51** 1123
- [34] French D M, Shiffler D, Cartwright K 2013 *Phys. Plasmas* **20** 083116
- [35] Matsui T 2017 *J. Infrared Millim. Te.* **38** 1140
- [36] Fulton T, Rohrlich F 1960 *Ann. Phys.* **9** 499
- [37] Schwinger J 1949 *Phys. Rev.* **75** 1912
- [38] Madey J M J 1971 *J. Appl. Phys.* **42** 1906
- [39] Koch H W, Motz J W 1959 *Rev. Mod. Phys.* **31** 920
- [40] Tamm I E 1991 *Selected Papers* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg) pp55–67
- [41] Luo C, Ibanescu M, Johnson S G, Joannopoulos J D 2003 *Science* **299** 368
- [42] Schächter L 2011 *Beam-Wave Interaction in Periodic and Quasi-Periodic Structures* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg) pp169–170
- [43] Van den Berg P M 1973 *J. Opt. Soc. Am.* **63** 689
- [44] Van den Berg P M 1973 *J. Opt. Soc. Am.* **63** 1588
- [45] Gover A, Dvorkis P, Elisha U 1984 *J. Opt. Soc. Am. B* **1** 723
- [46] García de Abajo F J 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 209
- [47] Wahlstrand J K, Merlin R 2003 *Phys. Rev. B* **68** 054301
- [48] Silveirinha M 2017 *Nat. Photonics* **11** 269
- [49] Liu F, Xiao L, Ye Y, Wang M, Cui K, Feng X, Zhang W, Huang Y 2017 *Nat. Photonics* **11** 289
- [50] Cortes C, Newman W, Molesky S, Jacob Z 2012 *J. Opt.* **14** 063001
- [51] Adamo G, MacDonald K F, Fu Y H, Wang C M, Tsai D P, García de Abajo F J, Zheludev N I 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 113901
- [52] So J K, García de Abajo F J, MacDonald K F, Zheludev N I 2015 *ACS Photonics* **2** 1236
- [53] Shekhar P, Pendharker S, Sahasrabudhe H, Vick D, Malac M, Rahman R, Jacob Z 2018 *Optica* **5** 1590
- [54] Fernandes D E, Maslovski S I, Silveirinha M G 2012 *Phys. Rev. B* **85** 155107
- [55] Jacob Z, Kim J Y, Naik G V, Boltasseva A, Narimanov E E, Shalaev V M 2010 *Appl. Phys. B* **100** 215
- [56] Caldwell J D, Kretinin A V, Chen Y, Giannini V, Fogler M M, Francescato Y, Ellis C T, Tischler J G, Woods C R, Giles A J, Hong M, Watanabe K, Taniguchi T, Maier S A, Novoselov K S 2014 *Nat. Commun.* **5** 5221
- [57] Esslinger M, Vogelgesang R, Talebi N, Khunsin W, Gehring P, De Zuani S, Gompf B, Kern K 2014 *ACS Photonics* **1** 1285
- [58] Narimanov E E, Kildishev A V 2015 *Nat. Photonics* **9** 214
- [59] Govyadinov A A, Konečná A, Chuvilin A, Vélez S, Dolado I, Nikitin A Y, Lopatin S, Casanova F, Hueso L E, Aizpurua J 2017 *Nat. Commun.* **8** 95
- [60] Qu T 2019 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [屈拓 2019 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [61] Shekhar P, Pendharker S, Vick D, Malac M, Jacob Z 2019 *Opt. Express* **27** 6970
- [62] Tao J, Wu L, Zheng G, Yu S 2019 *Carbon* **150** 136
- [63] Marqués R, Medina F, Rafii-El-Idrissi R 2002 *Phys. Rev. B* **65** 144440
- [64] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [65] Zharov A A, Shadrivov I V, Kivshar Y S 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 037401
- [66] Lezec H J, Dionne J A, Atwater H A 2007 *Science* **316** 430
- [67] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [68] Xi S, Chen H, Jiang T, Ran L, Huangfu J, Wu B I, Kong J A, Chen M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 194801
- [69] Zhang S, Zhang X 2009 *Physics* **2** 91
- [70] Duan Z, Tang X, Wang Z, Zhang Y, Chen X, Chen M, Gong Y 2017 *Nat. Commun.* **8** 14901
- [71] Akopov N, Aschenauer E C, Bailey K, et al. 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **479** 511
- [72] Nishino H, Clark S, Abe K, Hayato Y, Iida T, Ikeda M, Kameda J, Kobayashi K, Koshio Y, Miura M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 141801
- [73] Séguinot J, Ypsilantis T 1977 *Nucl. Instrum. Methods* **142** 377
- [74] Ginis V, Danckaert J, Veretennicoff I, Tassin P 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 167402
- [75] Duan Z, Wu B I, Xi S, Chen H, Chen M 2009 *Prog. Electromagn. Res.* **90** 75
- [76] Hsu C W, Zhen B, Stone A D, Joannopoulos J D, Soljačić M 2016 *Nat. Rev. Mater.* **1** 16048
- [77] Kim S, Baek I K, Bhattacharya R, Hong D, Sattarov M, Bera A, So J K, Kim D S, Park G S 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800041
- [78] Song Y, Jiang N, Liu L, Hu X, Zi J 2018 *Phys. Rev. Appl.* **10** 064026
- [79] Yang Y, Massuda A, Roques-Carnes C, Kooi S E, Christensen T, Johnson S G, Joannopoulos J D, Miller O D, Kaminer I, Soljačić M 2018 *Nat. Phys.* **14** 894
- [80] Kodigala A, Lepetit T, Gu Q, Bahari B, Fainman Y, Kanté B 2017 *Nature* **541** 196
- [81] Marinica D C, Borisov A G, Shabanov S V 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 183902
- [82] Kimura W D, Kim G H, Romea R D, Steinhauer L C, Pogorelsky I V, Kusche K P, Fernow R C, Wang X, Liu Y 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 546
- [83] Kumar V, Kim K-J 2006 *Phys. Rev. E* **73** 026501
- [84] Ye Y, Liu F, Cui K, Feng X, Zhang W, Huang Y 2018 *Opt. Express* **26** 31402
- [85] Denis T, van Dijk M W, Lee J H H, van der Meer R, Strooisma A, van der Slot P J M, Vos W L, Boller K J 2016 *Phys. Rev. A* **94** 053852
- [86] Von Laven S, Branscum J, Golub J, Layman R, Walsh J 1982 *Appl. Phys. Lett.* **41** 408
- [87] Wiggins S M, Jaroszynski D A, McNeil B W J, Robb G R M, Aitken P, Phelps A D R, Cross A W, Ronald K, Ginzburg N S, Shpak V G, Yalandin M I, Shunailov S A, Ulmaskulov M R 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 2393
- [88] Kim K J, Song S B 2001 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **475** 158
- [89] Chen H-T, Taylor A J, Yu N 2016 *Rep. Prog. Phys.* **79** 076401
- [90] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M 2013 *Science* **339**

- 1232009
- [91] Yu N, Capasso F 2014 *Nat. Mater.* **13** 139
- [92] Brownell J H, Doucas G 2005 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **8** 091301
- [93] Wang Z, Yao K, Chen M, Chen H, Liu Y 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 157401
- [94] Yang Y, Roques-Carnes C, Kaminer I, Zaidi A, Massuda A, Yang Y, Kooi S E, Berggren K K, Soljačić M *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, California, May 13, 2018 pFW4 H.1
- [95] Su Z, Cheng F, Li L, Liu Y 2019 *ACS Photonics* **6** 1947
- [96] Gamzina D, Li H, Himes L, Barchfeld R, Popovic B, Pan P, Letizia R, Mineo M, Feng J, Paoloni C, Luhmann N C 2016 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **15** 85
- [97] Hu P, Lei W, Jiang Y, Huang Y, Song R, Chen H, Dong Y 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 973
- [98] Liu S, Zhang C, Hu M, Chen X, Zhang P, Gong S, Zhao T, Zhong R 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 201104
- [99] Shin Y M, So J K, Jang K H, Won J H, Srivastava A, Park G S 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 031502
- [100] Breuer J, Hommelhoff P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 134803
- [101] Esarey E, Schroeder C B, Leemans W P 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1229
- [102] Peralta E A, Soong K, England R J, Colby E R, Wu Z, Montazeri B, McGuinness C, McNeur J, Leedle K J, Walz D, Sozer E B, Cowan B, Schwartz B, Travish G, Byer R L 2013 *Nature* **503** 91
- [103] Rosolen G, Wong L J, Rivera N, Maes B, Soljačić M, Kaminer I 2018 *Light-Sci. Appl.* **7** 1
- [104] Friedman A, Gover A, Kurizki G, Ruschin S, Yariv A 1988 *Rev. Mod. Phys.* **60** 471
- [105] Gover A, Yariv A 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 2596
- [106] Mikhailov S A 2013 *Phys. Rev. B* **87** 115405
- [107] Tsui D C, Gornik E, Logan R A 1980 *Solid State Commun.* **35** 875
- [108] Chen C D, Hu X P, Xu Y L, Xu P, Zhao G, Zhu S N 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 071113
- [109] Tien P K, Ulrich R, Martin R J 1970 *Appl. Phys. Lett.* **17** 447
- [110] Saltiel S M, Sheng Y, Voloch-Bloch N, Neshev D N, Krolikowski W, Arie A, Koynov K, Kivshar Y S 2009 *IEEE J. Quantum Electron.* **45** 1465
- [111] Zhang Y, Gao Z D, Qi Z, Zhu S N, Ming N B 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 163904
- [112] Wai P K A, Menyuk C R, Lee Y C, Chen H H 1986 *Opt. Lett.* **11** 464
- [113] Coen S, Randle H G, Sylvestre T, Erkintalo M 2013 *Opt. Lett.* **38** 37
- [114] Brasch V, Geiselmann M, Herr T, Lihachev G, Pfeiffer M H, Gorodetsky M L, Kippenberg T J 2016 *Science* **351** 357

SPECIAL TOPIC—Optical metamaterials

Cherenkov radiation based on metamaterials*

Lin Yue-Chai Liu Fang[†] Huang Yi-Dong[‡]

(*Department of Electronic Engineering, Beijing National Research Center for Information
Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(Received 22 February 2020; revised manuscript received 7 April 2020)

Abstract

Cherenkov radiation (CR) is an electromagnetic radiation emitted by charged particles traveling through a dielectric medium at a speed faster than the phase velocity of light. CR plays an important role in the fields of particle detection, biomedicine and electromagnetic-radiation source. Recently, metamaterials demonstrate their novel mechanical, acoustic, and optical properties by delicately designing the structures and materials. In metamaterials, the electromagnetic properties, such as wave propagation, coupling, and radiation, could be flexibly manipulated. Thus, it is expected that the combination of vacuum electronics and micro- & nano-photonics would result in numerous novel phenomena and effects by having free electrons interacting with metamaterials. In this paper, we firstly review the concept and generation mechanism of CR. Then, recent research advances in the CR generation by using different types of metamaterials are reviewed, including threshold-less CR in hyperbolic metamaterials, reverse CR in negative metamaterials, CR lasing based on high Q -factor metamaterials and Smith-Purcell radiation manipulation with metasurfaces. The unique characteristics and interesting mechanisms of CR based on these metamaterials are elaborated. The research and development of interaction between free electrons and various metamaterials open up possibilities for realizing novel integrated free-electron devices.

Keywords: metamaterials, free electrons, Cherenkov radiation, Smith-Purcell radiation

PACS: 41.60.Bq, 81.05.Xj, 52.59.Rz

DOI: 10.7498/aps.69.20200260

* Project supported by the National K&D Program of China (Grant No. 2018 YFB2200402), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575104, 61621064), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. Z180012), Beijing Innovation Center for Future Chip, and Beijing Academy of Quantum Information Science.

[†] Corresponding author. E-mail: liu_fang@tsinghua.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: yidonghuang@tsinghua.edu.cn