

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417506

基于 Fabry-Perot 共振增强钾铯锑光电阴极的研究^{*}

王 玉 彭新村 邹继军 邓文娟 江霖霖

(东华理工大学核技术应用教育部工程研究中心 南昌 330013)

摘要: 正电子亲和势钾铯锑光电阴极具有驱动激光波长较长(532 nm)、量子效率高、长寿命、响应时间快等优点,在电子源领域具有广阔的应用潜力,但受限于材料本身的光电特性,有效的运输距离很短,不足以吸收所有入射光的驱动激光能量,进而量子效率也受到影响。因此本文将法布里-珀罗腔结构引入到光电阴极中,来提高入射驱动激光的有效吸收,通过时域有限差分方法展开仿真研究,使其有源层钾铯锑光吸收达到 90%,并对其反射层银和介质层氮化硅进行实验制备与验证,同时通过文献实验拟合,预测了其量子效率为 11.17%,来满足未来高亮度、高重频电子源的要求。

关键词: 法布里-珀罗共振; K_2CsSb 光电阴极; 光吸收

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.2

Research on the enhancement of K_2CsSb photocathode based on Fabry-Perot resonance

Wang Yu Peng Xincun Zou Jijun Deng Wenjuan Jiang Linlin

(Engineering Research Center of Nuclear Technology Application, Ministry of Education, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: The positive electron affinity potassium cesium antimony photocathode has driving laser wavelength is longer (532 nm), high quantum efficiency, long life, fast response time, in the field of electronic source has broad application potential, but limited by the photoelectric characteristics of the material itself, effective transport distance is very short, not enough to absorb all the incident light driven laser energy, and quantum efficiency is also affected. Therefore, this article introduced the Fabry-Perot cavity structure into the photocathode, to improve the effective absorption of incident driven laser, through the time domain finite difference method simulation study, make the active layer potassium cesium antimony light absorption reached 90%, and the reflective layer silver and dielectric layer silicon nitride were prepared and verified, predicted the quantum efficiency is 11.17%, to meet the requirements of high brightness, high frequency electron source in the future.

Keywords: Fabry-Perot resonance; K_2CsSb photocathode; light absorption

0 引 言

以钾铯锑(potassium cesium antimony, K_2CsSb)为代表的碱金属铯化物光电阴极作为超高真空电子发射器件,由于其正电子亲和势(positive electron affinity, PEA)的性质,能够产生比砷化镓(gallium arsenide, GaAs)更短的电子束,光电发射时间短,响应速度更快,能允许在更苛刻的真空条件下生存,并且可以实现大面积制备工艺,制备工艺简单成本低,并且在光电倍增管、微光探测、电子激光器和

加速器电子源^[1-2]等领域得到广泛应用。但是 K_2CsSb 本身有效运输距离短,其有源层较薄的特征使其光吸收能力较差,成为限制其提升性能的重要因素之一。

为了解决这一问题,文献[2-3]利用矩形槽阵列光栅结构以实现铯铯/槽结构金属基底界面实现表面等离化激元(surface plasmons polaritons, SPPs)共振,其吸收增强了 3 倍,量子效率(quantum efficiency, QE),增强了两倍,但同时也增大了光电阴极的发射度。文献[4-5]提出利用光学谐振和干涉效应,直接在金属衬底上生长阴极材料、

收稿日期:2024-12-01

* 基金项目:国家自然科学基金(12375158, 62061001, 61961001)、江西省自然科学基金(20232ACB202004)、江西省重点研发计划资助项目(20223BBH80005)资助

利用高反射率金属实现光子的二次吸收以增强量子效率,较高的衬底反射率会增强薄膜中的干涉效应,并有助于增强吸收,在给定的波长下,利用银(silver, Ag)和不同金属上分别沉积上特定厚度的铯化铟(cesium antimonide, Cs₃Sb)和 K₂CsSb 光电阴极使其达到峰值来增强光子吸收,提高了 30%。但是这种光吸收仅靠金属的反射,其吸收波长固定,不可调,如果需要增强其他波长处的吸收,则需要改变 K₂CsSb 本身的厚度,无法实现很好的光学调控性能。Alexander 等^[6-7]通过理论仿真等研究工作表示通过表面光学纳米结构的优化可以提升 K₂CsSb 有源区的光吸收。而国内外在光电发射阴极器件中应用法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)腔结构目前尚无文献报道,但是 F-P 谐振器广泛被认为能够展示完美的吸收,因为电磁波在谐振器中多次往返造成的相位延迟。因此,许多关于基于 F-P 腔的相关设计的研究已经进行。例如,文献[8]提出使用 Ag-SiO₂-Ag 腔设计已经实现了完美的吸收。最大吸收强度达到 97%,Chen 等^[9]提出基于波导 F-P 腔效应的光学传输模型,实现了超过 95%的透射率。文献[10]中设计了金属-半导体-金属(metal-semiconductor-metal, MSM)型量子阱红外探测器结构成功在 52 THz 和 106 THz 处实现了 F-P 共振,均产生了 95%以上的吸收。

F-P 腔因其简单的结构,强的光学共振响应,光调控优势和可调谐性被广泛应用于光通信、激光光谱技术^[11]、太阳能光伏电池^[12]、传感器^[13-14]和可调谐滤波器^[15-16]等应用中,而在正电子光电发射器件中尚未有任何应用先例。因此本文基于以上背景,通过 Spicer's 的三步发射模型^[17]对 K₂CsSb 光电阴极光电子发射过程开展了时域有限差分方法(finite-different time-domain, FDTD)仿真研究。在如何提高 K₂CsSb 光电阴极的光吸收的基础上,提出将 F-P 谐振腔引入至光电阴极中,设计了 F-P 共振的薄膜结构使其在 532 nm 波长下实现谐振腔激发,以降低光电阴极整体反射率,通过改变共振腔的厚度,增加光电阴极对入射光能量的有效吸收,在纳米级超薄有源层实现高光吸收,在理论上进行设计、仿真、优化和验证。

1 研究方法

本文利用三层的 F-P 共振结构实现了可见光波段的窄带超吸收以及可见光波段的多峰超吸收。首先,运用时域有限差分的方法以及理论公式,对三层薄膜结构进行了详尽地理论分析,确认了其中的 F-P 共振模式以及引发超吸收的机制。通过简单的调控中间氮化硅(silicon nitride, Si₃N₄)的厚度,可以实现宽波段内的可调谐式超吸收,这种超吸收结构制作工艺简单,可以完全依靠现有成熟的镀膜工艺,从而使这种结构在光学领域有着广阔的应用价值。

1.1 法布里-珀罗腔三层结构

设计的具有 F-P 谐振腔结构的 K₂CsSb 光电阴极结构如图 1 所示,三层结构分别是底层金属 Ag,顶层为超薄有

源层 K₂CsSb 为 50 nm 和中介质层 Si₃N₄ 为 287 nm 形成法布里-珀罗腔,衬底为 GaAs。其中金属层的厚度达到一定值后就可以产生足够的反射以激发共振(仿真过程中选取为 200 nm),阴极层 K₂CsSb 的厚度通常为制备工艺所采用的厚度^[18-20],F-P 介质腔 Si₃N₄ 的厚度用于调节共振峰位。与传统光电阴极相比,设计的 F-P 结构所引起的干涉效应改变了可见光的吸收能力^[21],增强了中介质层 Si₃N₄ 的电磁场,而底层金属提供强烈的反射,从而增强了顶层界面区域的光吸收,并且在腔内形成驻波共振,导致有源层 K₂CsSb 在特定波长处的高吸收和最小的反射,其共振波长是由 Si₃N₄ 厚度决定的^[22]。并利用时域差分算法,研究中间 Si₃N₄ 薄膜的厚度与共振吸收峰波长的关系,光吸收增强的机制以及入射光偏转角度对吸收特性的影响。在模拟仿真确认最佳参数以后采用等离子体增强化学气相沉积(plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD)等镀膜工艺制备超吸收三层薄膜结构。

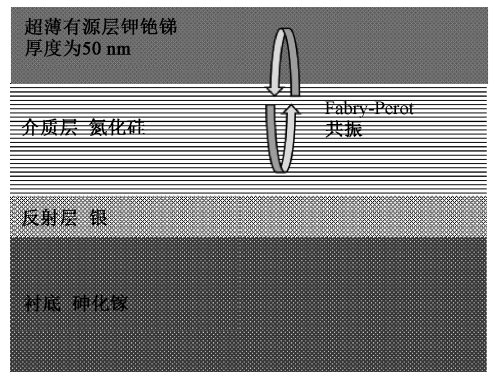


图 1 K₂CsSb 光电阴极结构

Fig. 1 K₂CsSb Photocathode structure

图 2 能带模型中, h 为普朗克常数, ν 为激光频率, E_{VBM} 为价带最大, E_{CBM} 为导带最小, E_{VAC} 为真空能级, E_F 为费米能级, E'_{VAC} 肖特基效应减小后的能级, ΔE_a 为外部电场诱导的电子亲和势降低, E_g 为禁带隙, E_a 为电子亲和势^[23-24]。该模型可以用三步光电发射^[17]来解释,3 个过程分别为光子吸收和光电子激发在光电阴极,光电子迁移到真空界面和有足够的能量从表面产生电子束^[2],模型的每步都有一个概率,这三者的乘积为量子效率,因此可以得出吸收与量子效率有很大关系。

1.2 理论计算与仿真

对于法布里-珀罗谐振腔,可以通过下面公式计算,编写 matlab 程序,得到驻波峰与特定 Si₃N₄ 的厚度关系,即 F-P 共振处的波长。

$$\lambda_F = \frac{2 \sum_i n_i H_i}{q_F - (\varphi_1 + \varphi_2)/2\pi} \quad (1)$$

其中, q_F 为发生法珀腔的级数, n_i 和 H_i 分别为高反射率金属膜上面第 i 层光学薄膜的折射率和厚度, φ_1 和 φ_2 分别为驻波共振腔中顶层上表面和底层下表面光反射引起

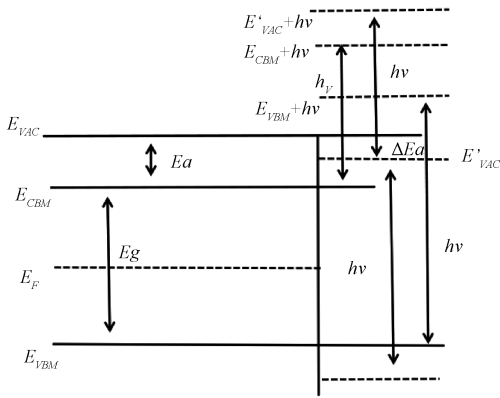
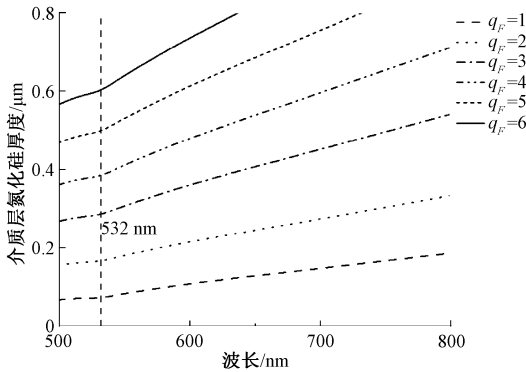


图 2 正电子光电阴极能带图

Fig. 2 Positron photocathode band diagram

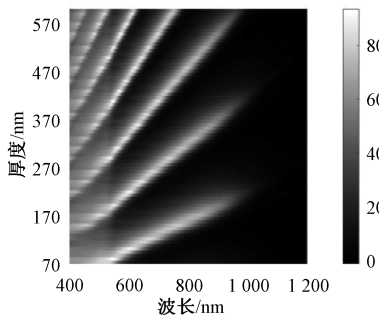
的相位差^[25]。计算结果如图 3(a)所示,其中虚线为波长 532 nm 峰值下的不同氮化硅的厚度,对应 1-6 级共振。

图 3(b)为图 1 所示的一种 F-P 共振腔增强型 K₂CsSb 光电阴极的仿真结果,其中衬底为 GaAs,底层为 200 nm 的高反射率金属银膜,顶层为超薄 50 nm 的 K₂CsSb,介质腔层 Si₃N₄ 厚度与有源层 K₂CsSb 光吸收关系如图所示。可以看到 F-P 共振的波长随介质共振腔 Si₃N₄ 的厚度变化,覆盖 K₂CsSb 光电阴极 400~1 200 nm 的全部工作波段,不同的 F-P 腔级数与理论结果得到对应。



(a) 理论公式计算结果

(a) The results of the theoretical formula



(b) 仿真吸收光谱

(b) Simulation of the absorption spectra

图 3 Si₃N₄ 厚度与波长关系

Fig. 3 Si₃N₄ thickness and wavelength relationship

由图 4 可知,对于 F-P 共振腔增强型 K₂CsSb 光电阴

极,选择厚度为 287 nm 的介质共振腔进行 FDTD 建模仿真,在超薄的 K₂CsSb 光电发射有源层中实现的多级 F-P 共振增强吸收,分别在 532 nm、737 nm 波长处激发了 3 级和 2 级驻波共振。其中在 532 nm 波长处激发的 3 级共振使得超薄 K₂CsSb 光电发射的光吸收率高达 90%。

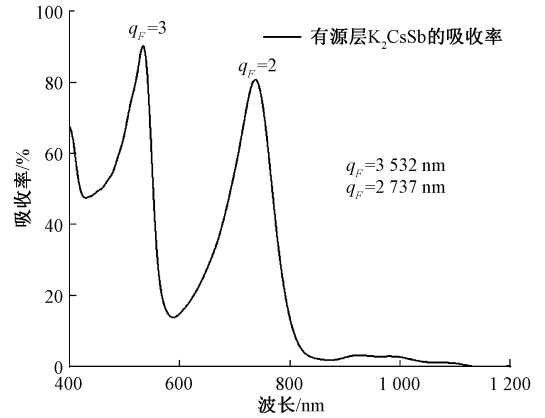


图 4 介质层 Si₃N₄ 厚度为 287 nm 时吸收率

Fig. 4 The absorption rate when the dielectric layer Si₃N₄ thickness is 287 nm

2 仿真与分析

本文光电阴极光学仿真都是在 FDTD 光学软件中进行的,图 5 为 FDTD 仿真模型,模拟时间为 2 000 fs,收敛标准为 5×10^{-5} ,对 *xy* 方向选择区域边界条件为周期条件,对 *z* 方向完全匹配层,网格精度设置 0.04 μm,光源为平面波并垂直入射,仿真范围 400~1 200 nm, Si₃N₄ 厚度以 5 nm 为步长进行仿真,同时设置场监视器观察整体的电场分布。

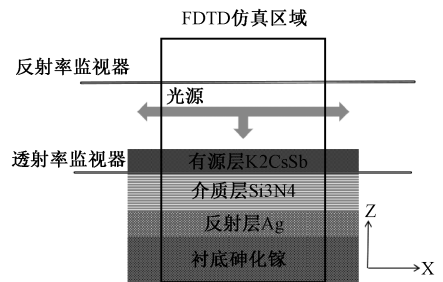


图 5 FDTD 仿真横截面图

Fig. 5 Cross-section diagram of the FDTD simulation

2.1 光学仿真

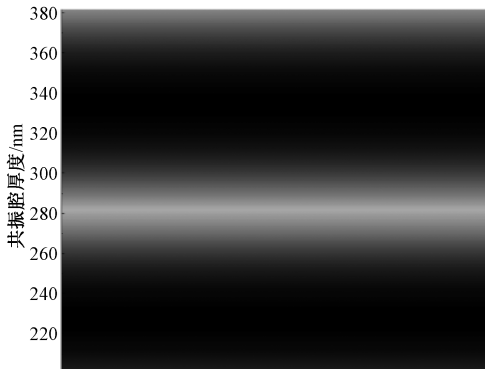
F-P 共振增强 K₂CsSb 光电阴极结构分为 3 层:底层 Ag 膜厚度选取 200 nm,可以保证 400~1 200 nm 入射光不透过,共振腔为 Si₃N₄,顶层为 K₂CsSb,厚度选取为超薄的 50 nm,以保证最大程度吸收,并在两层薄膜之间形成法珀腔,在腔内形成 F-P 共振,对中间 Si₃N₄ 厚度与有源层 K₂CsSb 吸收的关系进行仿真,波长设定为 532 nm,仿真结果如表 1 所示。

表 1 共振峰 532 nm 处 Si₃N₄ 厚度、吸收和反射率

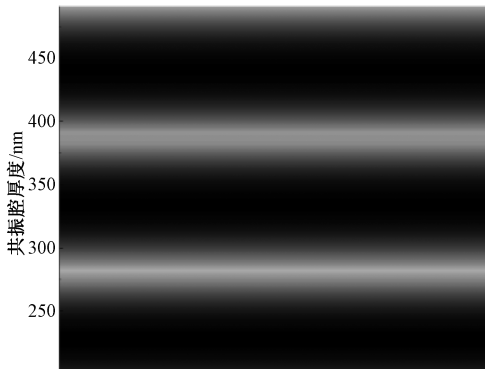
Table 1 Si₃N₄ thickness, absorption, and reflectance at the 532 nm resonance peak

Fabry-Perot 共振级数 q_F	1	2	3	4	5	6
介质层 Si ₃ N ₄ 厚度/nm	70	179	287	389	497	604
吸收率/%	81	86	90	82	89	75
反射率/%	6	4	3	5	5	6

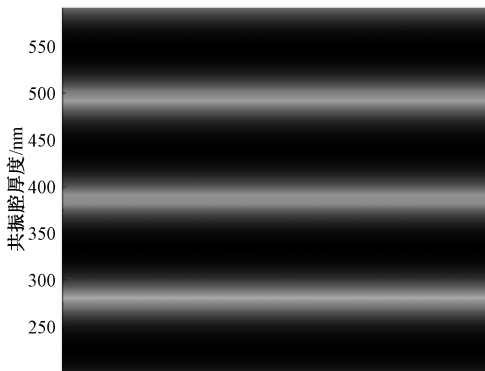
同时模拟了表 1 共振峰处的电场分布,结果如图 6 所示:二到六级法珀共振峰处腔内形成了驻波图案,每一级次的共振会在腔内形成与级次相等数量的电场极大值,从左至右依次对应法珀共振的二到六级。



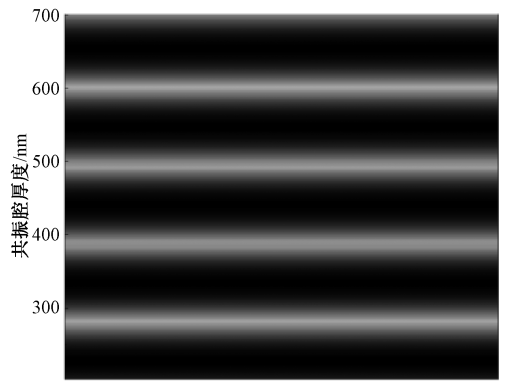
(a) 二级共振
(a) Second order resonance



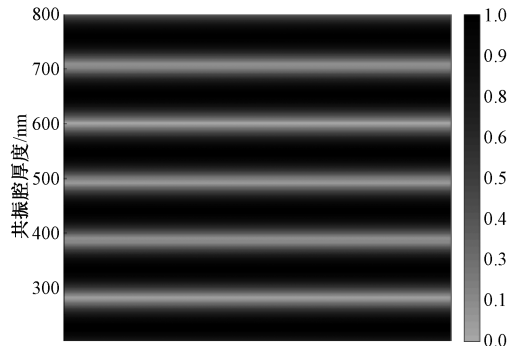
(b) 三级共振
(b) Third order resonance



(c) 四级共振
(c) Fourth order resonance



(d) 五级共振
(d) Fifth order resonance



(e) 六级共振
(e) Sixth order resonance

图 6 共振峰处,不同腔内电场分布

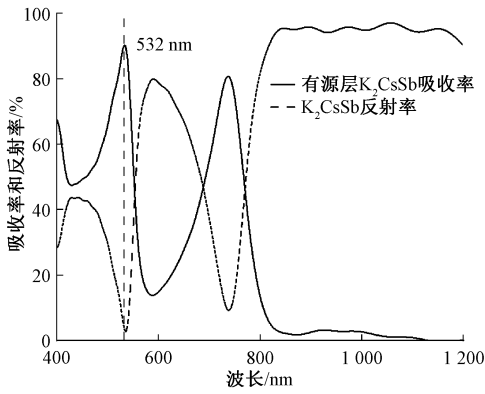
Fig. 6 At the resonance peak, the electric field distribution indifferent cavities

2.2 F-P 共振结构参数优化

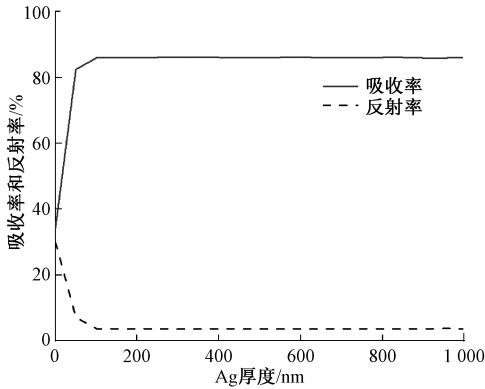
结合图 3 和表 1,得知改变 Si₃N₄ 厚度的同时得到了不同的有源层 K₂CsSb 吸收峰值,同时考虑工艺成本,本文对共振腔 Si₃N₄ 厚度进一步优化为 287 nm,通过式(1)计算得到的结果与 FDTD 仿真结果一致,触发三级共振,确保在特定的 532 nm 波长下产生得到反射和高吸收分布图像。

如图 7(a)所示,在仿真中,入射光被垂直地照在阴极表面,当光电阴极被入射光垂直照射时,在 532 nm 波长处出现了 90% 多的增强吸收和 3% 的超低反射,这表明 F-P 共振引发了这种吸收,当 F-P 共振被激发时,底层 Ag 与 K₂CsSb 薄膜之间的界面电磁场发生变化,与设计的薄膜结构保持一致。阴极层 K₂CsSb 的厚度通常为制备工艺所采用的厚度,选取为 50 nm 进行仿真,F-P 介质腔 Si₃N₄ 的厚度用于调节共振峰位,通过理论公式与仿真进行验证优化得到,最后通过实验制备与表征确定了厚度。此外,银的高反射特性主要由其光学常数决定,而与其厚度关系不大。从图 7(b)(其他仿真参数不变)可以看出,当银厚度大于 100 nm 时,反射和吸收效率不会随着 Ag 的厚度变化而变化。这意味着金属层的厚度达到一定值后就可以产生足够的反射以激发共振。

图 8 为优化后 F-P 结构的电场分布图,在 Si₃N₄ 共振



(a) 固定氮化硅厚度为287 nm
(a) The fixed silicon nitride thickness was 287 nm



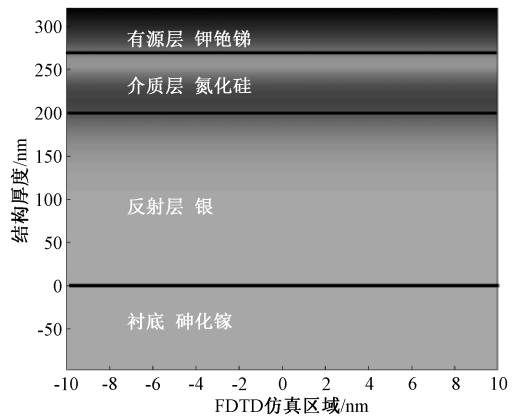
(b) 改变金属银的厚度
(b) Change the thickness of the metallic silver

图 7 F-P 腔结构的吸收和反射谱

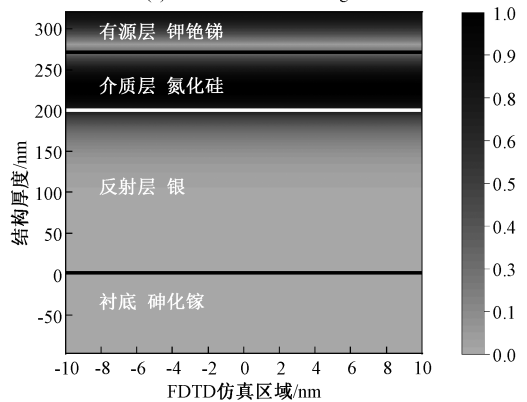
Fig. 7 Absorption and reflection spectra of the F-P cavity structures

厚度为 70 nm 即发生一级共振的地方(其他仿真参数保持不变),如图 9(a)、(b)所示,此时图 9(a)非共振波长为 415 nm,图 9(b)共振波长为 532 nm,FDTD 模拟仿真获得了两个波长处的电场分布。

从图 9(a)看出入射光大部分被反射回去,没有在腔内形成典型的 F-P 共振,所以基本不存在吸收。图 9(b)可以看到电场主要被局域在两层膜形成的腔内,通过之前的分析,已经知道这是一级的 F-P 共振,即形成共振时,共振波长处的入射光被两层膜不断地反射,从而在腔内出现了电场增强现象。经过以上对共振峰与非共振峰处电场的分析,确认了吸收是因为发生了 F-P 共振引起的,而发生法珀共振需要满足特定条件,即在材料和腔长确定的情况下,只有特定波长,才可以激发 F-P 共振,所以这种三层薄膜结构会形成这种窄带的超吸收峰。



(a) 非共振波长415 nm
(a) Non-resonant wavelength 415 nm



(b) 共振波长532 nm
(b) Resonant wavelength 532 nm

图 9 不同波长下的电场分布

Fig. 9 Electric field distribution at different wavelengths

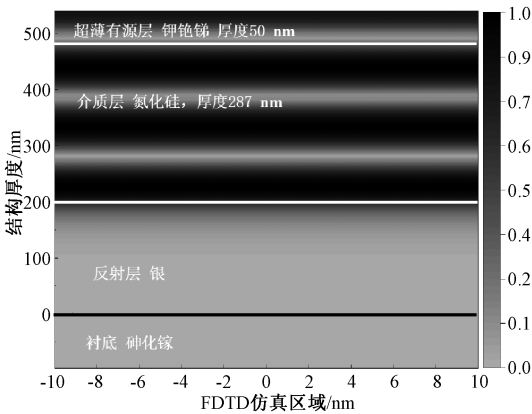


图 8 腔长 287 nm,三级共振处电场分布

Fig. 8 Chamber length 287nm, electric field distribution at the tertiary resonance

腔内,出现了电场增强现象,并形成驻波图案。因此得到超吸收的原理,共振波长处的入射光,在两层膜之间形成共振,不断反射,并激发 F-P 腔内的驻波共振,出现电场增强现象,从而引起了超吸收。

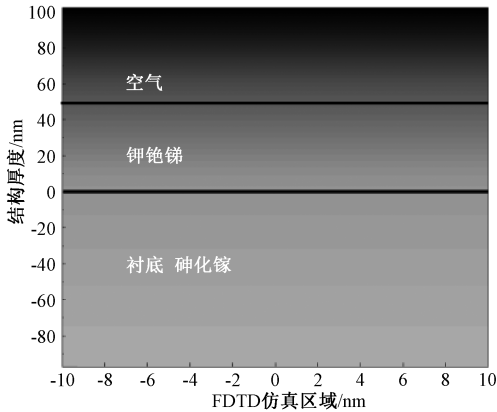
2.3 光吸收增强机制分析

研究 F-P 结构引发的超吸收发生的条件,取中间 Si_3N_4

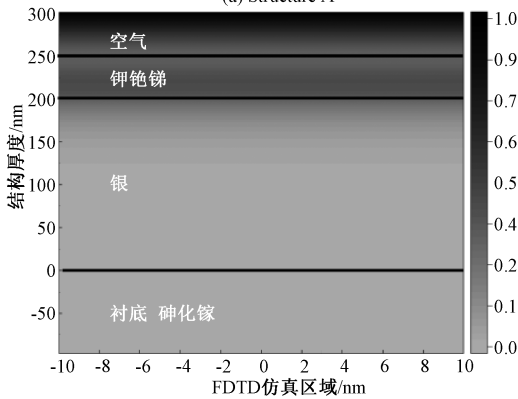
本文提出将 F-P 共振引入 K_2CsSb 光电阴极进而提高光吸收效率的方法,为了验证理论的合理性,设置了不同的薄膜结构。结构 A: K_2CsSb -GaAs 衬底、结构 B: K_2CsSb -Ag-GaAs 衬底、结构 C: K_2CsSb - Si_3N_4 -GaAs 衬底和结构 D: F-P 共振结构,仿真过程中 K_2CsSb 厚度为超薄 50 nm,激发波长为 532 nm,通过对比不同的薄膜结构的电场及有

源层 K_2CsSb 吸收仿真结构的差异性,可以得到引入 F-P 共振对吸收的影响。

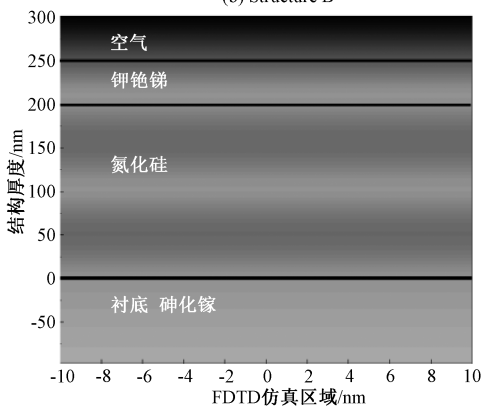
对不同结构模拟其电场分布,如图 10 所示,可以看到图 10(a)~(c)的电场集中分布在空气端, K_2CsSb 及衬底几乎没有电场分布,没有得到吸收增强,而图 10(d)引入 F-P 共振结构后,得到电场增强,形成驻波图案。图 11 为图 10 所示不同结构的有源层 K_2CsSb 的吸收率,波长 532 nm 下的吸收率分别是 42.3%、47.5%、39% 和 90%。通过对比不同薄膜结构,得出单纯的薄膜结构,其吸收率是由于光学损耗引起。而图 11(d)产生的超吸收是引入法布里-珀罗谐振腔所引起的。



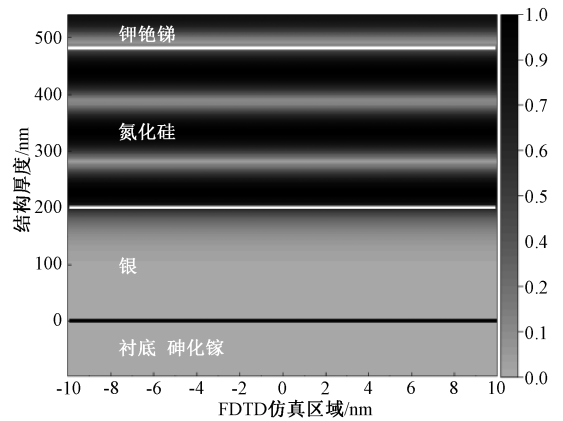
(a) 结构A
(a) Structure A



(b) 结构B
(b) Structure B



(c) 结构C
(c) Structure C



(d) F-P共振结构
(d) F-P resonance structure

图 10 有无 F-P 结构的 K_2CsSb 光电阴极在 532nm 下的电场分布图

Fig. 10 Electric field distribution at 532 nm of K_2CsSb photocathodes with or without F-P structure

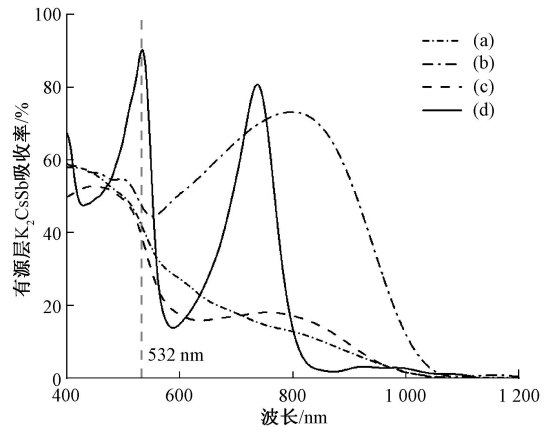


图 11 不同结构的有源层 K_2CsSb 吸收率

Fig. 11 Absorption rate of active layers K_2CsSb for different structures

2.4 入射光角度对结构超吸收特性的影响

在此前仿真都是基于入射光垂直入射的条件进行的,但是在电子枪实际应用中,由于各种因素,入射光的入射方向不一定是完全垂直于界面,因此有必要对非正常角度进行仿真验证。

对于倾斜入射的情况,其仿真设置与垂直入射时略有不同。带角度入射时, xy 方向需要将周期性边界条件改为布洛克边界条件,而且其入射光不可以像之前那样设置成一个宽光谱的光源,需要设置成单点波长,这是由于 FDTD 算法的特殊性要求的^[26]。所以,为了计算倾斜入射,从 400~1 200 nm 波段内,每间隔 0.1 μm 取一个波长,每次计算一个特定的波长,然后将所有的计算结果拟合成曲线如图 12 所示。

仿真结果表明在 $0\sim 25^\circ$,共振峰发生的位置没有太大

变化,但峰值处吸收率略有下降,得出结论共振波长和峰值对入射光偏转不敏感^[16],但是随着入射角度的继续增加,光强分解到 x 方向电场逐渐变弱,斜入射破坏了结构对称性,削弱了传输效率,降低了吸收率,并发生蓝移。因此得到共振波长对照射角度为 $0\sim 25^\circ$ 相对不敏感,具有一定的实用价值。

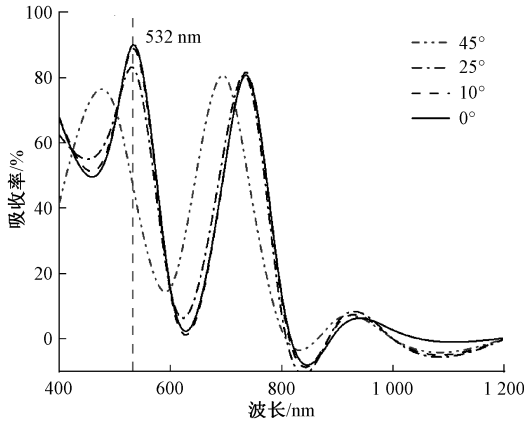


图 12 不同入射光偏转角度下吸收谱曲线

Fig. 12 Absorption spectrum curves at different incident light deflection angles

2.5 实验验证

为了验证 F-P 结构的合理性,本研究进行了相应的实验,首先在衬底 GaAs 上利用热蒸发镀膜进行金属银的蒸镀,然后利用 PECVD 工艺进行蒸镀氮化硅薄膜,最后进行阴极层制备。

对 F-P 结构进行了扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 测试和反射率测试。F-P 结构样品的剖面结构如图 13(a), 可以清晰可见 F-P 结构中反射层和介质层的分层。在样品表面反射率测试结果如图 13(b) 所示, 可以发现样品的实测反射率与理论仿真反射率有所偏差, 这主要由于生长的样品实际厚度与理论设计厚度存在一定差异, 其次在 $300\sim 400$ nm 差异较大, 主要是由于氮化硅在该波段有较强的吸收^[27-28]。

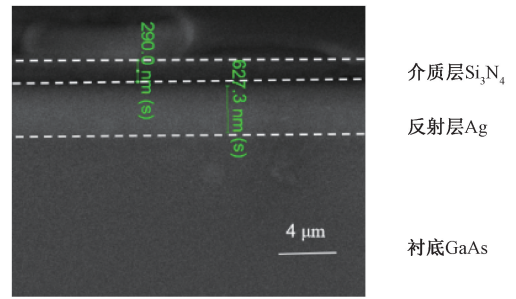
结合 SEM 测试结果并拟合实测反射率曲线, 拟合得到的结构参数如表 2 所示。对于 F-P 结构中, 反射层金属 Ag 实际厚度不做考虑, 达到一定厚度就可以产生足够的反射以激发共振, 介质层 Si_3N_4 实际厚度为 290 nm。阴极层 K_2CsSb 正在制备中, 但是由于制备条件需要极高真空下, 存在许多难点, 目前还无法制备出来, 因此对 F-P 共振结构 K_2CsSb 光电阴极进行实验拟合来预测其量子效率。

2.6 预测量子效率

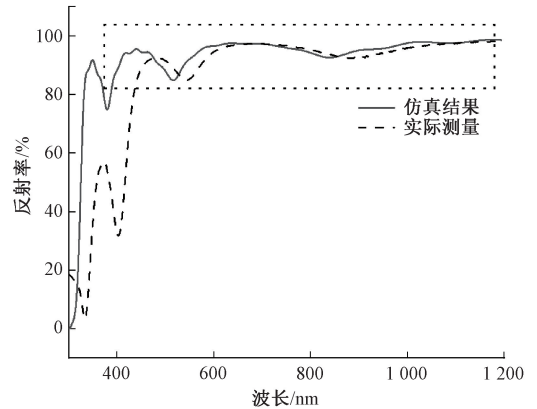
量子效率是衡量光电阴极性能的主要指标, 根据三步发射模型^[17]得到量子效率公式^[29]为:

$$QE(\lambda) = P_g(\lambda) \times P_t(\lambda) \times P_e(\lambda) \quad (2)$$

其中, P_g 、 P_t 和 P_e 分别为吸收效率, 传输效率和发射



(a) SEM 表征
(a) SEM characterization



(b) 样品反射率实测、理论对比图

(b) Measured reflectance and theoretical comparison diagram of the sample

图 13 F-P 结构的样品制备与测试

Fig. 13 Sample preparation and testing of the F-P structure

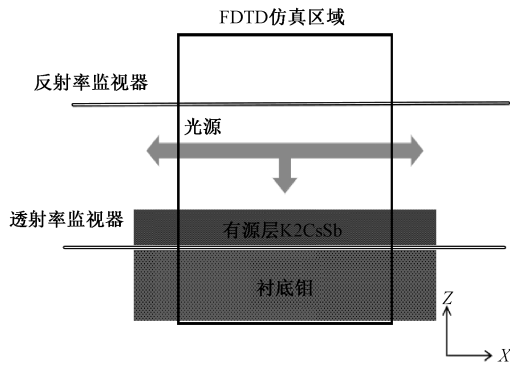
效率。本文 K_2CsSb 输运和发射效率是通过实验拟合得到的, 通过文献[20]中的实验测量得到的量子效率, 建立 FDTD 模型仿真得到其吸收效率, 代入式(2)中, 得到发射和输运的乘积, 模型中认为光电子逸出过程与未引入 F-P 共振结构时相同^[3], 然后去估算本文结构的量子效率, 也对图 10(a) 无 F-P 腔结构进行了量子效率估测。

表 2 样品结构参数

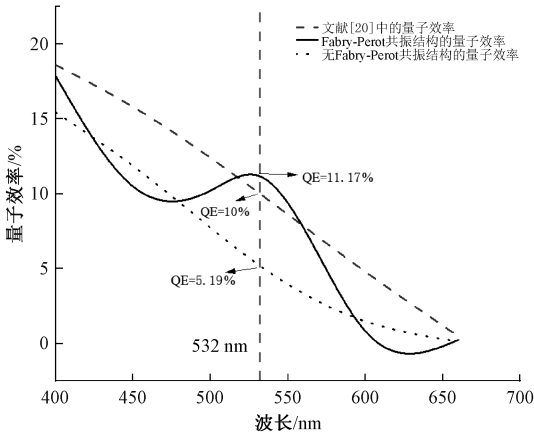
Table 2 Sample structural parameters nm

材料	Fabry-Perot 共振结构	
	实际值	理论值
反射层金属 Ag	627	200
介质层 Si_3N_4	290	287

文献[20]中在钼 (Molybdenum, Mo) 基底上进行沉积 K_2CsSb , 其 K_2CsSb 厚度为 40 nm, 在 $400\sim 660$ nm 波段进行光谱扫描, 其中 532 nm 波长处量子效率为 10%, 因此本研究建立 FDTD 仿真模型如图 14(a) 所示, 选取该波段进行仿真。由图 14(b) 可以得知 F-P 腔结构的光电阴极吸收峰处量子效率比没有 F-P 腔结构的提高 6%, 比文献[20]中提高了 1.17%, 说明 F-P 腔结构确实能增强 K_2CsSb 光电阴极的光吸收, 从而提高了量子效率。



(a) 文献[20]结构的FDTD模型图
(a) FDTD model diagram of literature structure



(b) 不同结构量子效率拟合对比
(b) Comparison of quantum efficiencies of different structures

图 14 实验拟合

Fig. 14 Experimental fitting

3 结 论

本文通过 FDTD 模拟了将 F-P 共振引入 K_2CsSb 光阴极的结构,在理论上进行设计、仿真、优化和验证。选取 GaAs 为衬底,利用底层高反射率金属银和顶层超薄 K_2CsSb 形成一个法珀腔,其共振波长,通过中间共振腔 Si_3N_4 的厚度决定的。通过理论公式与仿真的共振峰得到了较好对应,分析了中间 Si_3N_4 薄膜的厚度与共振吸收峰波长的关系以及偏转角度对吸收特性的影响,共振波长对入射角度相对不敏感,预测其量子效率,通过改变共振腔厚度进行调控,实现了超高吸收,有望增强量子效率等性能,为实验提供指导性依据。

参考文献

[1] XIE J Q, DEMARTEAU M, WAGNER R, et al. Synchrotron X-ray study of a low roughness and high efficiency K_2CsSb photocathode during film growth[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(20): 205303.

[2] JIANG Z G, GU Q, LI X D, et al. Monte Carlo simulations of electron photoemission from plasmon-

enhanced bialkali photocathode[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2021, 24(3): 033402.

- [3] 姜增公. 基于微纳结构的新型光阴极及加速技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所), 2019.
- JIANG Z G. Research on novel photocathode and accelerator technology based on micro-nano structure[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [4] ALEXANDER A, GAO W M, MISTRY S, et al. Robust method for broadband efficiency enhancement of electron photocathodes using optical interferences[J]. Aip Advances, 2021, 11(6): 065325.
- [5] ALEXANDER A. Optical resonances for enhanced quantum efficiency photocathodes [M]. California: University of California, 2018.
- [6] ALEXANDER A, MOODY N A, BANDARU P R, et al. Enhanced photocathode performance through optimization of film thickness and substrate [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2017, 35(2): 022202.
- [7] JIANG Z G, GU Q, LI X D, et al. Effect of plasmonic near field on the emittance of plasmon-enhanced photocathode[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2018, 897: 14-17.
- [8] LI Z Y, BUTUN S, AYDIN K. Large-area, lithography-free super absorbers and color filters at visible frequencies using ultrathin metallic films[J]. ACS Photonics, 2015, 2(2): 183-188.
- [9] CHEN X Y, GU L P, HUANG P J, et al. Optical transmission properties of Si_3N_4 add-drop micro-ring resonator induced by a Fabry-Perot resonance effect[J]. Sensors, 2021, 21(19): 6370.
- [10] 黄磊, 杨春花, 刘红梅, 等. 基于法布里-珀罗共振的红外探测器性能分析[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2024, 40(4): 9-12.
- HUANG L, YANG CH H, LIU H M, et al. Performance analysis of infrared detectors based on Fabry-Perot resonance[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2024, 40(4): 9-12.
- [11] 刘清权, 关学显, 崔恒毅, 等. 法布里-珀罗光学微腔及其应用[J]. 光学学报, 2023, 43(16): 117-141.
- LIU Q Q, GUAN X Y, CUI H Y, et al. Fabry-Pérot optical microcavity and its application [J]. Optics Express, 2023, 43(16): 117-141.
- [12] ISOAHO R, AHO T, AHO A, et al. High performance low-bandgap (0.8 eV) single junction

- GaInNAsSb solar cells incorporating Au-based back surface reflectors[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 234: 111413.
- [13] 杨玉强,张钰颖,高佳乐,等.一阶光学游标效应的全光纤温度传感器[J].*电子测量与仪器学报*,2024,38(4): 234-240.
- YANG Y Q, ZHANG Y Y, GAO J L, et al. All-fiber temperature sensor based on first-order optical Vernier effect [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(4): 234-240.
- [14] 丁武成,魏鹤鸣,韦妍,等.基于氮化硅膜片的光纤法布里-珀罗声波传感器[J].*光学学报*, 2025, 45(2):0206008.
- DING W CH, WEI H M, WEI Y, et al. Silicon nitride membrane-based fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor[J]. *Optics Express*, 2025, 45(2):0206008.
- [15] 文丰,张岩,贾兴中.基于 F-P 可调谐滤波器的光纤光栅解调系统设计[J].*电子测量技术*, 2022, 45(9): 38-43.
- WEN F, ZHANG Y, JIA X ZH. Design of fiber grating demodulation system based on F-P tunable filter[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(9): 38-43.
- [16] CAO S H, CHEN N, JIANG Y J. Angle insensitive filters based on Fabry-Pérot resonance structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 136(19): 193102.
- [17] SPICER W E, HERRERA-GOMEZ A. Modern theory and applications of photocathodes [C]. *The International Society for Optical Engineering*, 1993.
- [18] 赵敏,孙建宁,钱芸生,等. K₂SbCs 光电阴极光谱响应特性模拟[J].*红外技术*, 2018, 40(3): 289-293.
- ZHAO M, SUN J N, QIAN Y SH, et al. Theoretical investigation of spectral response characteristics of K₂SbCs photoelectric cathode[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(3): 289-293.
- [19] 孙建宁,司曙光,王兴超,等.一种利用反射率理论模型指导 K₂CsSb 光电阴极的制备方法[J].*红外技术*, 2017, 39(12): 1087-1091.
- SUN J N, SI SH G, WANG X CH, et al. Preparation method of K₂CsSb photocathode using the reflectance theory model[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(12): 1087-1091.
- [20] XIE H M, BENZVI I, RAO T, et al. Experimental measurements and theoretical model of the cryogenic performance of bialkali photocathode and characterization with Monte Carlo simulation [J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2016, 19(10): 103401.
- [21] WANG P D, ZENG X H, WANG J. AlN film-based Fabry-Perot cavity resonance enhanced absorption[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2021, 15(1): 016002.
- [22] LI Q, GAO J S, YANG H G, et al. Mechanism investigation of a narrow-band super absorber using an asymmetric Fabry-Perot cavity [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(4): 1-8.
- [23] GUO L, KATOH M. Pn-type substrate dependence of CsK₂Sb photocathode performance [J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2019, 22(3): 033401.
- [24] LI X D, GU Q, ZHANG M, et al. The QE numerical simulation of PEA semiconductor photocathode[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2012, 36(6): 531-537.
- [25] PENG X C, TANG B, WANG R B, et al. Broadband omnidirectional infrared nanophotonic spectral controller for GaInAsSb thermophotovoltaic cell[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 248: 111986.
- [26] 孙阳.基于等离子体超表面的红外器件光学特性研究[D].南京:南京邮电大学, 2023.
- SUN Y. Research on optical properties of infrared devices based on plasma metasurfaces [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [27] HAMMADI O A, KHALAF M K, KADHIM F J. Silicon nitride nanostructures prepared by reactive sputtering using closed-field unbalanced dual magnetrons[J]. *Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2017, 231(5): 479-487.
- [28] BELIAEV L Y, SHKONDIN E, LAVRINENKO A V, et al. Optical, structural and composition properties of silicon nitride films deposited by reactive radio-frequency sputtering, low pressure and plasma-enhanced chemical vapor deposition [J]. *Thin Solid Films*, 2022, 763: 139568.
- [29] PENG X C, POELKER M, STUTZMAN M, et al. Mie-type GaAs nanopillar array resonators for negative electron affinity photocathodes [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 860-874.

作者简介

王玉,硕士研究生,主要研究方向为半导体制造。

E-mail:3217204750@qq.com

彭新村(通信作者),副教授,主要研究方向为半导体制造。

E-mail:xcpeng@ecit.cn