基于表面等离激元共振与狄拉克的灵敏度可调太赫兹液体/气体生物传感器

半金属

任梦娇[1], 季成鹏[1], 唐雪艳[1], 田海山[1], 蒋乐勇[1, *], 戴晓宇[2], 和吴兴华[3,1] 中国湖南省长沙市湖南师范大学物理与电子科学学院，邮编 *410081*；[2]中国湖

摘要

本文研究了一种灵敏度可调的太赫兹（THz）液体/气体生物传感器，其采用耦合棱镜—三维狄拉克半金属（3D DSM）多层结构。该生物传感器的高灵敏度源于表面等离激元共振（SPR）模式产生的尖锐反射峰。由于反射率可通过三维狄拉克半金属的费米能调节，该结构实现了灵敏度可调。此外，研究发现，灵敏度曲线很大程度上取决于三维狄拉克半金属的结构参数。经过参数优化，我们获得了灵敏度超过 100°/RIU 的液体传感器。我们认为，这种简单的结构为实现高灵敏度、可调谐的传感器件提供了参考思路。

关键词：生物传感器、狄拉克半金属、表面等离激元共振。

1. 引言

光学生物传感器是一种微纳功能器件，可将难以测量的生物信号转换为易于观察和测量的光信号。光波与待测生物分析物相互作用时，生物分析物特性的微小变化会表现为光信号参数的明显相对变化，从而实现对生物分析物特性或周围环境的准确识别和检测。这类传感器无需标记或修饰生物分子 [1]，因此广泛应用于生物医学 [2,3]，血液检测 [4]，生化检测 [5]，环境监测 [6]，食品安全 [7]等领域。近年来，微纳尺度生物传感器已成为生物传感器领域的研究热点，许多光学生物传感器技术也受到广泛关注，例如荧光法 [8],比色法 [9]，光纤 [10],倏逝波光子学 [11]，等。此外，随着人们不断追求高灵敏度和结构简单的传感器，许多光学传感器结构被提出并得到深入研究，例如碳纳米管 [12],微谐振器 [13]，表面波成像[14] 和光子晶体带隙[15]等。与传统光学生物传感器方案相比，表面等离子体共振（SPR）生物传感器具有许多独特优势，例如灵敏度高、实时检测、易于穿透且无损。因此，SPR传感技术已广泛应用于生化分析 [16]，食品安全 [17]，医学诊断 [18] 等领域，并取得了显著成效，例如检测

牛奶中的葡萄球菌肠毒素 [19], 药物残留检测 [20, 21], 实时疾病诊断 [22], 气体检测 [23], 等。然而，传统的表面等离激元共振结构通常采用基于贵金属（如 Au [24], Ag [25] 和 Al [26], 等）的 Otto 结构或 Kretschmann-Raether（KR）结构来激发表面等离激元共振。尽管这类结构也能实现灵敏度较高的生物传感，但贵金属的存在使其传感器仍存在固有损耗较大、带宽有限和动态可调性不足等缺点，也对表面等离激元共振传感器的应用造成了一定限制。近年来，二维材料石墨烯凭借优异的光电特性，在传感领域展现出广阔的应用前景，并成为替代传统贵金属以激发表面等离激元共振的理想选择。目前已有许多基于石墨烯的表面等离激元共振传感方案 [27, 28]。普遍认为，基于石墨烯的生物传感器在生物传感领域前景广阔。然而，由于石墨烯基功能器件制备方面存在局限，石墨烯基传感方案的实现与推广也面临工艺和制备方面的限制。因此，探索基于新型优异材料与结构的表面等离激元共振传感方案仍是一项具有挑战性的工作。

近年来，对三维狄拉克半金属（3D DSM）的深入研究为新型光学生物传感器开辟了新途径 [29]。3D DSM是一种三维狄拉克材料，其电子和光学特性与石墨烯相似，并且具有动态调控的潜力，同时保留了类金属块体结构的优势，具有一定的厚度且制备相对简单，

并在特定条件下表现出类金属性质 [30]。此外，它不仅具有超越石墨烯的超高电荷迁移率，还具有显著的非线性等离子体性能、更长的传播长度以及强烈的光与材料相互作用。此外，与石墨烯薄膜相比，3D DSM更易于制备和加工，因此能够更好地弥补石墨烯在光电器件方面的不足。这些特点为我们设计基于3D DSM的表面等离激元共振生物传感器提供了新的研究方向和思路。

基于此，本文从理论上提出了一种基于耦合棱镜-三维狄拉克半金属结构的太赫兹（THz）SPR传感器。在该结构中，通过结合耦合棱镜与三维狄拉克半金属，利用三维狄拉克半金属激发SPR，而不是采用传统的贵金属或石墨烯，从而实现了具有较高灵敏度的太赫兹SPR传感器。此外，我们进一步发现，三维狄拉克半金属的电导率可通过费米能和弛豫时间进行动态调节，从而为控制灵敏度和品质因数（FOM）提供了一种手段；同时，三维狄拉克半金属的厚度也会对传感器的灵敏度产生非常显著的影响。通过适当的参数优化，我们发现，当该结构应用于液体传感时，角度灵敏度可达到100 / RIU以上°。当该结构用于气体传感时，其灵敏度同样较高。我们认为，基于该结构的SPR可调谐光学生物传感器有望应用于生物、化学、环境检测等领域。

2. Theoretical Modeland Method

我们考虑一种KR结构，如图1所示，该结构由耦合棱镜和三维狄拉克半金属层组成。在该结构中，我们使用聚甲基戊烯（TPX）作为耦合

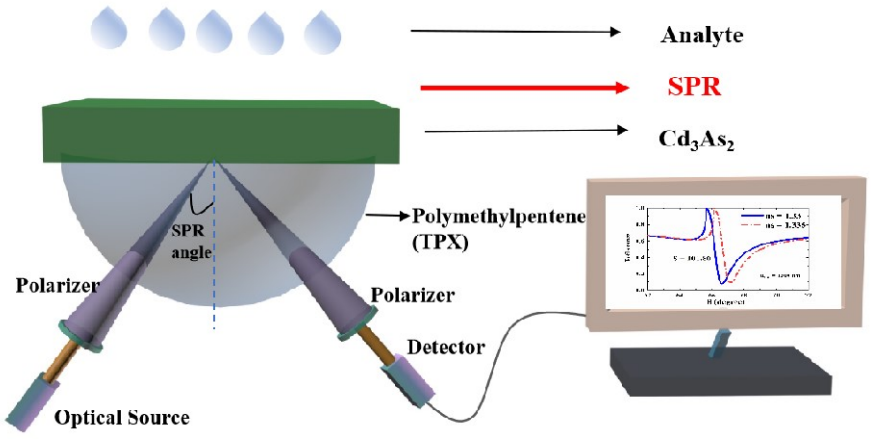

图 1. 基于棱镜与三维狄拉克半金属耦合的表面等离激元共振传感器示意图。

棱镜，其折射率为$_{p}$ 1 46。n = [31]，以及采用砷化镉（Cd_3As_2）的三维狄拉克半金属层，其折射率和厚度分别表示为 $_{DSM}n$ 和 $_{DSM}d$ 。众所周知，三维狄拉克半金属的电导率可通过电方式调谐，因此，通过在耦合棱镜与传感层之间加入三维狄拉克半金属，可以动态调谐整个结构的传感性能。对于三维狄拉克半金属，在弛豫时间近似下，存在半经典玻尔兹曼输运方程，即( )τ ε_k =τ，因此，三维狄拉克半金属的线性光学电导率和折射率可表示为 [32]：

$$\sigma_{DSM}(\omega)=\sigma_0\frac{4}{3\pi^2}\frac{\tau}{1-i\omega\tau}\frac{(k_BT)^2}{\hbar^2v_F}\left[2Li_2(-e^{-\varepsilon_F/k_BT})+(\frac{\varepsilon_F}{k_BT})^2+\frac{\pi^2}{3}\right], \quad (1)$$

$$\mathrm{n}+ik=\sqrt{1+i\sigma_{DSM}/\varepsilon_0\omega}, \quad (2)$$

其中， ω 是入射光的角频率，$_{F}E$ 是费米能，τ 表示弛豫时间，$\hbar$ 是约化普朗克常数，$_{B}k$ 和T 分别是玻尔兹曼常数和温度，$_{F}v$ 是费米速度，( )$_{s}Li\ z$ 是多对数函数， $\sigma_0=$ $^{2}/4\hbar e$。在接下来的计算中，原始参数的

三维狄拉克半金属设置为 0.1 电子伏特$_F E$ = 和 1.0 psτ = ，入射光频率为 1 THz。

为了获得整个结构的反射率，本方案采用较为成熟的传输矩阵法。我们知道，只有在 TM 偏振下才能激发表面等离激元共振。因此，我们只需考虑 TM 偏振的情况。首先，图1所示结构中耦合棱镜与三维狄拉克半金属的交界面，以及三维狄拉克半金属与上方传感层的交界面处的传输矩阵分别为:

$$D_{p\to d}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1+\eta_1+\xi_1 & 1-\eta_1-\xi_1\\ 1-\eta_1+\xi_1 & 1+\eta_1-\xi_1\end{bmatrix}, \tag{3}$$

$$D_{d\to s}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1+\eta_2+\xi_2 & 1-\eta_2-\xi_2\\ 1-\eta_2+\xi_2 & 1+\eta_2-\xi_2\end{bmatrix}, \tag{4}$$

其中，$_{1\ p\ dz\ d\ pz}k/k\eta=\varepsilon\quad\varepsilon$，$/_{1\ 0dz\ d}k\xi=\sigma\quad/\varepsilon\ \varepsilon$，$_{2\ d\ sz\ s\ dz}k/k\eta=\varepsilon\quad\varepsilon$，$_{2\ 0sz\ s}k\xi=\sigma\quad\varepsilon\ \varepsilon$。并且，$_{iz}k$表示波矢$ik$ 在z 方向上的分量，$/_{i\ i}k\ c=\varepsilon\ \omega$。$c$ 为真空中的光速， ε_0 为真空介电常数， θ 为入射角。当电磁波在$\sqrt{}$厚度为 $_{DSM}d$ 的均匀三维狄拉克半金属介质中传播时，可表示为以下传播矩阵:

$$P_{DSM}(d_{DSM})=\begin{bmatrix}e^{-ik_z d_{DSM}} & 0\\ 0 & e^{-ik_z d_{DSM}}\end{bmatrix}. \tag{5}$$

对于图 1 所示的结构，整个结构的传递矩阵可表示为:

$$M=D_{p\to d}P_{DSM}D_{d\to s}, \tag{6}$$

因此，反射系数为：$_{21\ 11}r\ M\ M=$。基于以上内容，我们可以

最终得到该结构的反射率如下：

$$R_p = |r|^2. \tag{7}$$

对于传感器，衡量其性能的核心指标包括灵敏度、半高全宽（FWHM）、品质因数等。由于本文主要研究传感层折射率的微小变化所导致的 SPR 反射峰对应角度的微小偏移，因此采用角度灵敏度来衡量传感器，具体表示为：

$$S_\theta = \frac{\Delta\theta}{\Delta n}, \tag{8}$$

其中，$\Delta\theta$ 为共振角偏移，$n\Delta$ 表示折射率的变化。此外，品质因数的计算公式为：品质因数 $SDA = {}_\theta \cdot$ ，其中 $=1$ $DAFWHM$。

/

3. 结果与讨论

在本节中，我们讨论基于图 1 所示结构的 SPR 太赫兹生物传感器的传感特性。众所周知，对于 SPR 生物传感器而言，观察反射峰的变化是感知传感介质（如折射率等）特性微小变化的一种标准方法。本文假设电磁波以 θ 的角度从棱镜入射，并绘制存在或不存在三维狄拉克半金属时反射率随入射角变化的曲线，如图 2 所示。从图 2 可以看出，当不存在三维狄拉克半金属时，在 θ 大于 66° 的区域会发生全内反射；而加入三维狄拉克半金属后，在附近可以观察到一个较为明显的反射峰

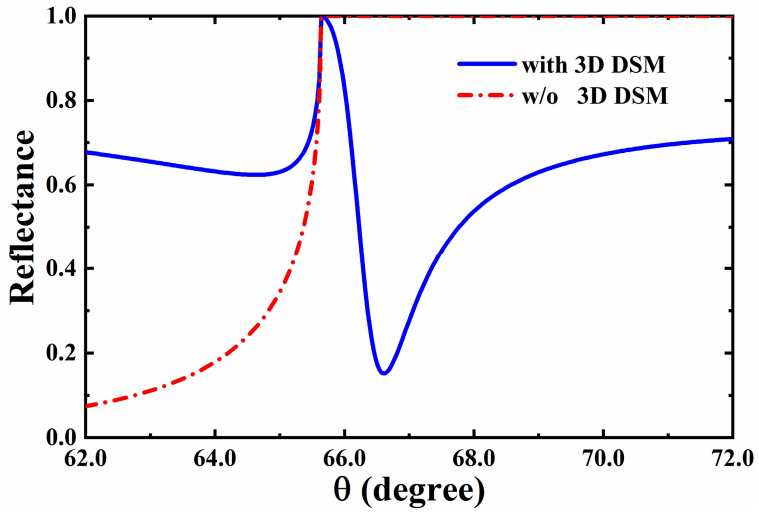

图 2. 有三维狄拉克半金属（蓝线）和无三维狄拉克半金属（红线）时反射率随入射角变化的对比图。

θ = 66 5°。这是由 SPR 激发引起的。SPR 的确认可以通过以下色散关系 [32] 得到：

$$\coth\left(\sqrt{q^2-\varepsilon_{DSM}\omega^2/c^2}\,\frac{d_{DSM}}{2}\right)=-\frac{\varepsilon_{DSM}}{\varepsilon_d}\frac{\sqrt{q^2-\varepsilon_d\omega^2/c^2}}{\sqrt{q^2-\varepsilon_{DSM}\omega^2/c^2}}, \tag{9}$$

其中$_{DSM}d$ 表示三维狄拉克半金属的厚度。由于色散曲线已在其他文献中展示，此处不再赘述。当该结构用于液体传感时，我们假设三维狄拉克半金属上方的半无限背景材料对应折射率为$_s$ =1 33的水溶液n 。在三维狄拉克半金属层上方构建流通池，即可在实际实验中实现这种水溶液。$_3$ $_2$Cd As 用作三维狄拉克半金属层，其初始厚度、费米能和弛豫时间分别为 1300 纳米$_{DSM}d$ = 、 =0.1 电子伏特$_FE$ 和 1.3 psτ = 。此时可以清楚地观察到，反射率曲线在66 61°, 附近出现一个尖锐的反射峰，这是表面等离激元共振激发的典型特征。当环境变化导致传感介质的折射率略有变化时，反射 马会

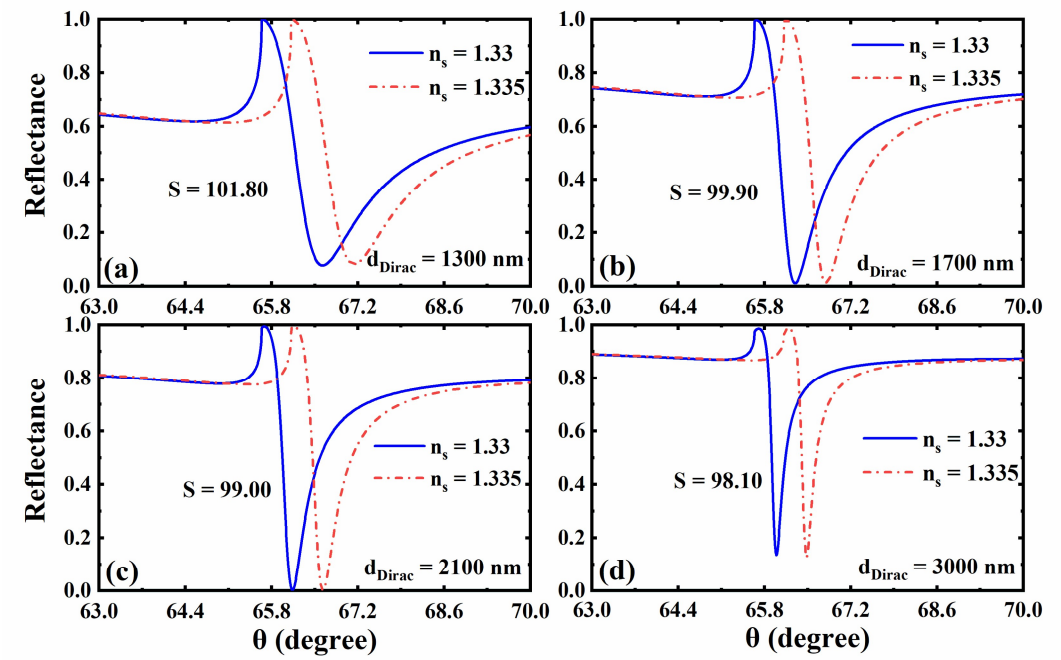

图3. 三维狄拉克半金属厚度分别取 1300 纳米(d_{DSM} = (a)、1700 纳米(d_{DSM} = (b)、2100 纳米(d_{DSM} = (c) 和 3000 纳米(d_{DSM} = (d) 时，反射率随入射角变化的曲线。

峰值将相应变化。我们采用广泛使用的折射率变化量 $0.005n\Delta$ = ，也就是说，当折射率变化至 $_s$ =1 335.n 时，反射峰从初始的 66.61° 移至 67.12°，折射率的微小变化会导致反射峰轻微偏移。根据上一节提到的表达式（8），我们可以计算出此时传感器灵敏度可达 102 /RIU° 。可以看出，该结构反射率曲线中的反射峰对传感层折射率的微小变化非常敏感，因此基于该结构的表面等离激元共振传感器方案是可行的。

结合前述理论，我们知道 SPR 的反射峰是

不仅与材料的结构参数有关，也与材料本身的特性有关。这些参数的变化对灵敏度的影响至关重要，为后续讨论

使我们能够设计出灵敏度更高的参考方案，因此我们重点关注其影响。

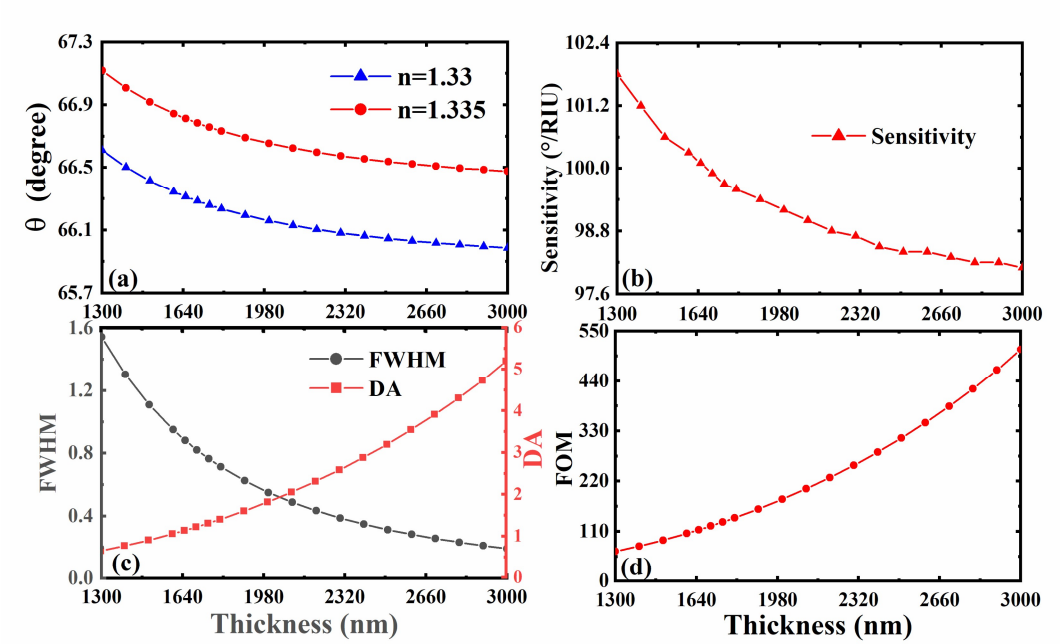

图4.不同三维狄拉克半金属厚度下，与反射峰对应的入射角(a)、传感器灵敏度(b)、FWHM和DA(c)、品质因数(d)。

各材料参数和结构参数对生物传感器灵敏度的影响提供了重要依据。首先，我们考察不同厚度的三维狄拉克半金属（3D DSM）下的反射率曲线及其传感性能。我们绘制了三维狄拉克半金属厚度分别为 1300 nm$_{DSM}d$ = ，=1700 nm$_{DSM}d$ ，=2100 nm$_{DSM}d$ 和 3000 nm$_{DSM}d$ = 时，传感器反射率随入射角变化的曲线，如图3所示。可以发现，在此范围内，三维狄拉克半金属不同厚度对应的反射率曲线均有相应的反射峰，即不会影响表面等离激元共振（SPR）的激发，但峰的尖锐程度略有不同，这会影响反射率曲线的半峰全宽（FWHM），进而影响传感器的品质因数（FOM）。因此，在此基础上，我们绘制了三维狄拉克半金属厚度从 1300 nm$_{DSM}d$ = 逐渐变化至 3000 nm$_{DSM}d$ = 时，各项相关传感器性能参数的变化趋势曲线，如图4所示。

从曲线结果可以清楚地看出，当三维狄拉克半金属的厚度为

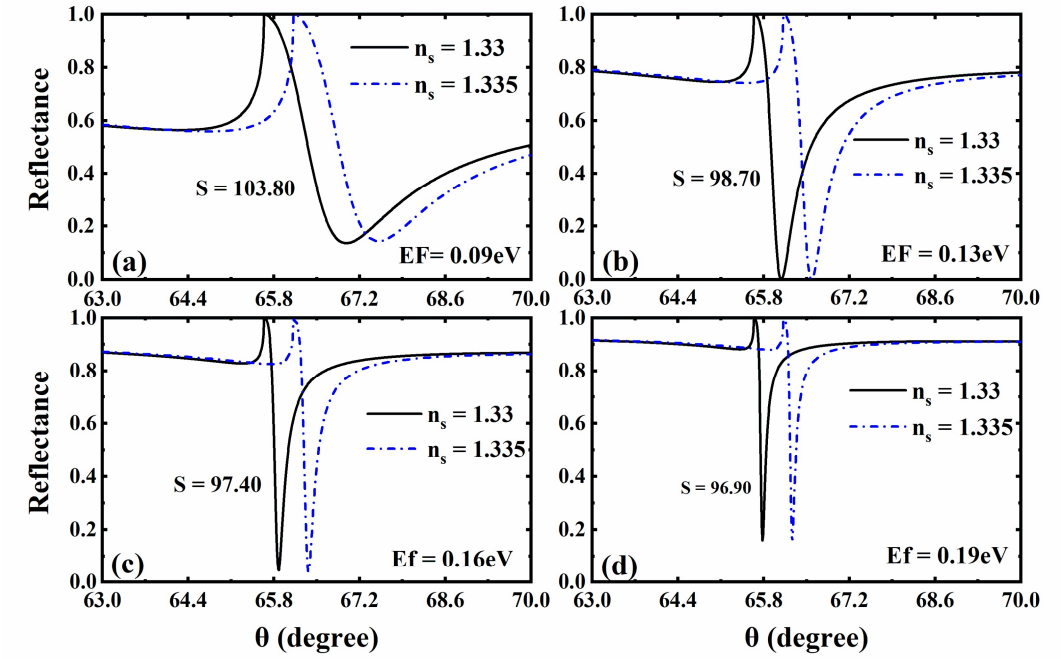

图5.当三维狄拉克半金属的费米能分别取0.09电子伏特$_FE$ =(a)、0.13电子伏特$_FE$ =(b)、0.16电子伏特$_FE$ =(c)和0.19电子伏特$_FE$ =(d)时，反射率随入射角变化的曲线。

在 1300~3000 纳米的范围内，随着厚度增加，品质因数上升而灵敏度下降，这对我们后续选择参数具有很好的指导作用。根据上述分析，较小的三维狄拉克半金属厚度会使传感器表现出更高的灵敏度。因此，我们尝试采用更薄的三维狄拉克半金属，并为便于计算，在后续设计中将其厚度固定为1300纳米$_{DSM}d$ =。在此基础上，我们将探索其他调控规律。

接下来，我们进一步讨论三维狄拉克半金属的材料参数特性对整个结构传感特性的影响。材料参数特性不仅有助于我们找到灵敏度较高的传感方案，也为实现动态可调灵敏特性提供了非常重要的参考。然后，我们首先关注三维狄拉克半金属的费米能变化对整个结构传感性能的影响，如图 5 所示。

当费米能为 0.09 电子伏特$_FE$ =， =0.13 电子伏特$_FE$， =0.16 电子伏特$_FE$， =0.19 电子伏特$_FE$，

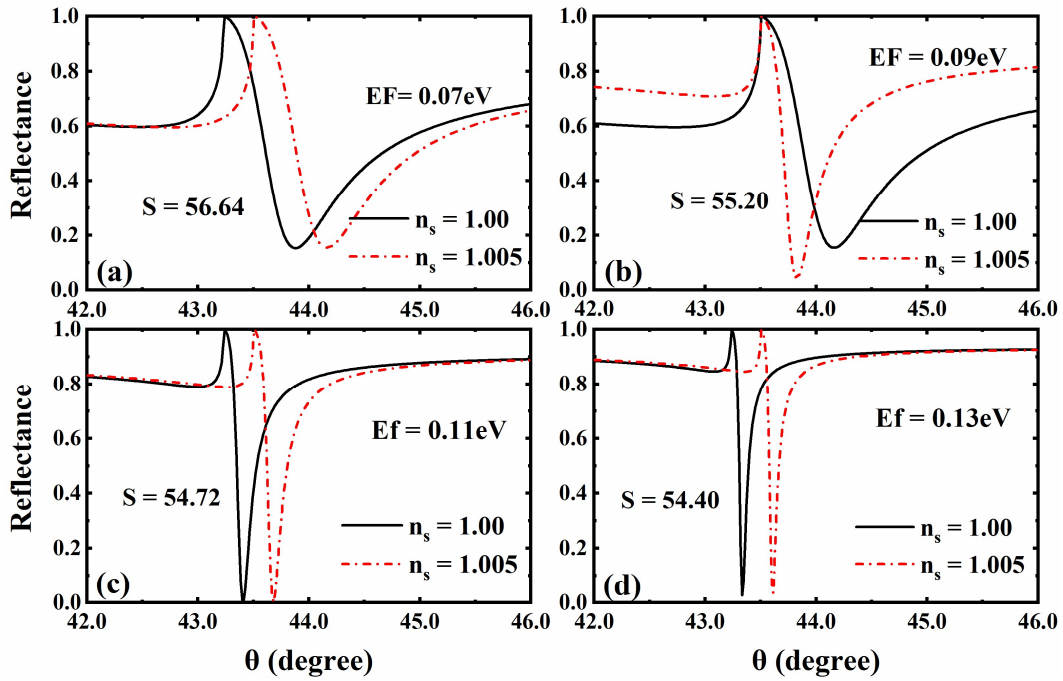

图6. 三维狄拉克半金属的费米能分别为=00.07 电子伏特$_FE$ （a）、=00.09 电子伏特$_FE$ （b）、=00.11 电子伏特$_FE$ （c）和=00.13 电子伏特$_FE$ （d）时，反射率随入射角变化的曲线。

得到反射率随入射角变化的曲线，并计算出该费米能下相应的传感器灵敏度。如图5所示，在0.09~0.19电子伏特范围内，其灵敏度随着费米能的增加而降低。然而，通过观察其反射峰的形状可以看出，当0.13 电子伏特$_FE$ = 时，反射峰更加尖锐，因此我们将费米能调整为0.13 电子伏特$_FE$ =。此外，我们在计算中发现，传感器性能随费米能变化的趋势曲线与不同三维狄拉克半金属厚度下的趋势曲线相似（图4），相关变化规律可参考图4。

在上述讨论中，我们通过参数优化选取了液体传感器的参数，还可以进一步探究传感介质为气体时的传感性能。我们将初始参数设为 1300 纳米$_{DSM}d$ =，τ =1.3 ps，并考察当

传感介质的折射率从 $_{s}=1\ 00.n$ 变为 $_{s}=1\ 005.n$ 时气体传感器的灵敏度。这里我们仅考虑了费米能的影响，并绘制了不同费米能下的反射率曲线对比图，如图6所示。对比后发现，与液体传感器相比，气体传感器反射峰对应的入射角更小。同时，随着费米能的增加，反射峰变得越来越尖锐，而相应的传感器灵敏度则呈逐渐下降的趋势。此外，经过一定的参数优化后，我们可以获得性能更好的气体传感器。

4. 结论

总之，我们提出了一种基于表面等离激元共振的太赫兹传感器方案。该方案通过耦合棱镜和三维狄拉克半金属激发表面等离激元共振，从而产生尖锐的反射峰。同时，引入三维狄拉克半金属显著提升了传感器灵敏度，也为动态调节其传感特性提供了一种途径。计算结果表明，表面等离激元共振生物传感器的传感性能不仅与结构参数有关，还与三维狄拉克半金属的材料参数密切相关。当该传感器用于液体传感时，通过结构和参数优化，可获得超过 100 /RIU° 的灵敏度；同时，该结构用于气体传感时也能取得良好的传感性能。与传统表面等离激元共振生物传感器相比，该方案结构更简单、制造工艺要求更低，且具有相对较高的灵敏度。我们相信，该方案有望在基于微纳结构的生物传感领域展现应用潜力。

致谢

本研究得到湖南省教育厅科学研究基金（项目编号：21B0048）、湖南省自然科学基金（项目编号：2022JJ30394）、长沙市自然科学基金（项目编号：kq2202236、kq2202246）以及江西省教育厅科学技术项目（项目编号：GJJ190911）的资助。

参考文献

1. Fan, X.; White, I. M.; Shopova, S. I.; Zhu, H.; Suter, J.D.; Sun, Y. 用于无标记靶标检测的灵敏光学生物传感器：综述。《分析化学学报》**2008年，** 620, 8-26. 2. Son, M. H.; Park, S. W.; Sagong, H. Y.; Jung, Y. K. 癌症生物标志物检测用电化学和光学生物传感器的最新进展。《生物芯片杂志》**2022年**, 17, 44-67. 3. Servarayan, K. L.; Sundaram, E.; Manna, A.; Sivasamy, V. V. 利用天然存在的色烯模拟合成受体检测胰岛素的无标记光学生物传感器：一种更绿色的方法。《分析化学学报》**2023年，** 1239, 340692. 4. Hamouleh-Alipour, A.; Forouzeshfard, M.; Baghbani, R.; Vafapour, Z. 基于等离激元超表面的光学纳米生物传感器用于血液血红蛋白浓度传感：可行性研究。 电气电子工程师学会。纳米技术汇刊。**2022年，** 21, 620-628. 5. Sanz, V.; Marcos, S. D.; Galbán, J. 一种基于过氧化物酶固有吸收特性的无试剂光学生物传感器。《生物传感器与生物电子学》**2007年，** 22, 956-964. 6. Sivakumar, R.; Lee, N. Y. 利用光学和电化学生物传感器检测空气传播病原体的最新进展。《分析化学学报》**2022年，** 1234, 340297. 7. Pebdeni, A. B.; Roshani, A.; Mirsadoughi, E.; Behzadifar, S.; Hosseini, M. 用于特异性检测食品和水中大肠杆菌的光学生物传感器最新进展。《食品控制》**2022年,** 135, 108822.

8. Yang, Y.; Lei, X.; Liu, B.; Liu, H.; Chen, J.; Fang, G.; Liu, J.; Wang, S. 基于金属酶模拟物的比率型荧光传感器，用于检测有机磷农药。《传感器与执行器*B*：化学》**2023年，** 377, 133031. 9. Zhu, J.; Yang, B.; Hao, H.; Peng, L.; Lou, S. 基于金纳米颗粒的农药比色分析：对适配体作用的批判性研究及另一种替代性传感器阵列策略。《传感器与执行器*B*：化学》**2023年，** 381, 133439. 10. Li, X.; Gong, P.; Zhang, Y.; Zhou, X. 用于选择性、高灵敏度葡萄糖检测的无标记微探针光纤生物传感器。 电气电子工程师学会。仪器与测量汇刊。**2022年，** 7, 1-8. 11. Huertas, C. S.; Calvo-Lozano, O.; Mitchell, A.; Lechuga, L. M. 用于核酸检测的先进倏逝波光学生物传感器：分析视角。 《化学前沿》**2019年，** 7, 724. 12. Shumeiko, V.; Malach, E.; Helman, Y.; Paltiel, Y.; Bisker, G.; Hayouka, Z.; Shoseyov, O. 一种基于肽包裹单壁碳纳米管、用于检测气相乙酸的纳米尺度光学生物传感器。《传感器与执行器*B*：化学》**2021年**, 327, 128832. 13. Malmir, K.; Habibiyan, H.; Ghafoorifard, H. 基于带有弯曲波导的微谐振器的超灵敏光学生物传感器。 《光学》**2020年，** 216, 164906. 14. Konopsky, V. N.; Alieva, E. V. 基于平面光波导的成像生物传感器。《光学与激光技术》 **2019 年，** 115, 171-175. 15. Khani, S.; Hayati, M. 利用等离激元和光子晶体带隙结构的光学生物传感器检测基底细胞癌。 《科学报告》**2022年，** 12, 1-19. 16.Puttharugsa, C.; Wangkam, T.; Houngkamhang, N.; Yodmongkol, S.; Gajanandana, O.; Himananto, O.; Sutapun, B.; Amarit, R.; Somboonkaew, A.; Srikhirin, T. 一种利用固定化抗原通过表面等离激元共振检测抗体的聚合物表面。《当代应用物理》**2013年，** 13, 1008-1013. 17. BİBEROĞLU, Ö. 利用光学生物传感器测定食品中的单核细胞增生李斯特菌。《凡城兽医杂志》**2020年，** 31, 50-55. 18. Ermini, M. L.; Mariani, S.; Scarano, S.; Minunni, M. 利用表面等离激元共振检测单核苷酸多态性的生物分析方法

生物传感器。《生物传感器与生物电子学》**2014年，** 61, 28-37. 19. Homola, J.; Dostálek, J.; Chen, S.; Rasooly, A.; Jiang, S.; Yee, S. S. 用于检测牛奶中葡萄球菌肠毒素B的光谱表面等离激元共振生物传感器。*Int. J. Food. Microbiol.***2002年，** 75, 61-69. 20. Situ, C.; Crooks, S. R.; Baxter, A. G.; Ferguson, J.; Elliott, C. T. 使用多通道高通量表面等离激元共振生物传感器在线检测猪胆汁中的磺胺二甲嘧啶和磺胺嘧啶。《分析化学学报》 **2002年，** 473, 143-149. 21. Caldow, M.; Stead, S. L.; Day, J.; Sharman, M.; Situ, C.; Chris, E. 用于检测蜂蜜中泰乐菌素残留的光学表面等离激元共振生物传感器检测方法的开发与验证。*J.Agric.Food.Chem.* **2005年，** 53, 7367-70. 22. Riedel, T.; Rodriguez-Emmenegger, C.; Pereira, A. S.; Bědajánková, A.; Jinoch, P. Boltovets, P. M.; Brynda, E. 通过表面等离激元共振生物传感器检测临床血清样本中的埃巴病毒感染。《生物传感器与生物电子学》**2014年，** 55, 278-284. 23.Yuxin, L.; Hailiang, C.; Qiang, C.; Hongwei, L.; Zhigang, G. 空芯反谐振光纤中表面等离激元共振诱导的甲烷气体传感器。 *Opt. Fiber.Technol.***2023年**, 78,103293. 24. Lokman, N. F.; Bakar, A.; Ashrif, A.; Suja, F.; Abdullah, H.; Rahman, W. B. W. A.; Huang, N.; Yaacob, M. H. Au/壳聚糖/氧化石墨烯纳米结构薄膜对Pb (II)离子的高灵敏度表面等离激元共振响应。*Sens. Actuators. B. Chem.* **2014年，** 195, 459-466. 25. Leong, K. H.; Gan, B. L.; Ibrahim, S.; Saravanan, P. 合成由表面等离激元共振触发的Ag/TiO2光催化剂，用于降解内分泌干扰物。 *Appl. Surf. Sci.***2014年，** 319, 128-135. 26. Hu, M.; Li, M.; Li, M. Y.; Wen, X.; Deng, S.; Liu, S.; Lu, H. 采用Al-Ni双金属结构增强二维材料基表面等离激元共振传感器的灵敏度。 *Sensors.***2023年，** 23, 1714. 27.Fares, H.; Almokhtar, M.; Almarashi, J. Q. M.; Rashad, M.; Moustafa, S. 可调谐的石墨烯包覆介电纳米颗粒在可见光和近红外波段的窄线宽表面等离激元共振。 *Physica. E. Low.Dimens. Syst.Nanostruct.***2022年，** 142, 115300.

28. Chen, S.; Chu, S.; Song, Y.; Wu, H.; Liu, Y.; Peng, W. 基于石墨烯-金表面结构的近红外表面等离激元共振传感器，用于超灵敏生物检测。《分析化学学报》**2022年，** 1205, 339692. 29. Liu, Z. K.; Jiang, J.; Zhou, B.; Wang, Z. J.; Zhang, Y.; Weng, H. M.; Prabhakaran, D.; Mo, S. K.; Peng, H.; Dudin, P. 一种稳定的三维拓扑狄拉克半金属 Cd_3As_2。*Nat.Mater.* **2014年，** 13, 677-681. 30. Kotov, O. V.; Lozovik, Y. E. 三维狄拉克半金属薄膜中的介电响应与新型电磁模式。*Phys.Rev. B.***2016年，** 93, 235417. 31. Leyong, J.; Jiao, T.; Qingkai, W.; Yuexiang W.; Zhiwei Z.; Yuanjiang X.; Xiaoyu, D. 利用石墨烯调控太赫兹频段的光学 Tamm 态。*Chin.Opt. Lett.***2019年，** 17, 20008. 32.Ooi, K.; Ang, Y.S.; Zhai, Q.; Tan, D.; Ang, L.K.; Ong, C.K. 三维狄拉克半金属的非线性等离激元学。*APL.Photonics.***2019年，** 4, 034402.