

基于表面等离子体共振的钾蒸气数密度测量

梁杰豪^{ID}

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月24日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月13日

摘要

碱金属气室是用于磁场测量的原子磁强计的主要组成部分。为了实现对气室中碱金属气体数密度的测量, 本文提出了一种新的基于表面等离子体共振效应的碱金属气室密度测量方法。碱金属原子在极化状态下不同数密度的碱金属气体会产生微小的折射率差异, 通过表面等离子体共振(SPR)的方法测量该差异, 实现对该其数密度的测量。研究分析了适合钾原子气室数密度测量的角度调制的Kretschmann型棱镜耦合式SPR结构。理论计算结果表明, 在共振角度 42.6° 到 46° 内, 对应的钾金属数密度从 $1.97 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 到 $2.01 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 覆盖大部分较为常见的钾原子气室的密度范围。本文提供了一种新型实时、无接触、空间分布式定点的测量碱金属气体密度方法, 对原子磁强计的发展具有重要意义。

关键词

钾金属蒸气, 数密度, 表面等离子体共振, 原子磁强计

Measurement of Potassium Vapor Number Density Based on Surface Plasmon Resonance

Jiehao Liang^{ID}

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 24th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 13th, 2025

Abstract

The alkali metal gas chamber is the main component of the atomic magnetometer used for magnetic field measurement. In order to measure the number density of alkali metal gas in the gas chamber, a new method based on surface plasmon resonance effect is proposed. Alkali metal atoms in the

polarization state of different number density of alkali metal gas will have a small refractive index difference, through the surface plasmon resonance (SPR) method to measure the difference, to achieve the measurement of the number density. An angle-modulated Kretschmann prism-coupled SPR structure suitable for potassium atom chamber number density measurement is studied and analyzed. The theoretical calculation results show that the corresponding potassium metal number density ranges from $1.97 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ to $2.01 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ at the resonance Angle of 42.6° to 46° , covering most of the density range of the more common potassium atom gas chamber. This paper presents a new real-time, contactless, spatially distributed fixed-point measurement method for alkali metal gas density, which is of great significance to the development of atomic magnetometer.

Keywords

Potassium Metal Vapor, Number Density, Surface Plasmon Resonance, Atomic Magnetometer

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

原子磁强计可以在室温下工作, 无需造价高昂、技术复杂、抗干扰能力较差的低温设备, 可以采用全光学手段, 方便的引入电路控制进行操作, 系统轻便, 结构简单, 便于微型化和携带, 关键是制造和使用成本也很低。鉴于这些优点, 原子磁强计成为当前弱磁精密测量领域的一个热门方向[1]。碱金属原子气室广泛应用于超高灵敏磁场探测领域, 是磁强计等装置中物理传感器的核心部分[2]。气室中的碱金属蒸气密度对于原子磁强计研究具有重要意义。在原子磁强计中, 碱金属气室含有碱金属(K、Rb 和 Cs 中的一种或多种)和气体(氢、氮和惰性气体中的一种或多种)。与磁强计灵敏度有关的参数, 如光学厚度、原子极化率等, 都受碱金属蒸气密度的影响[3]。然而, 对于密封玻璃池内的碱金属蒸气的情况, 观察到的蒸气密度偏离经验公式多达两倍。有一些假说来解释它, 但原因仍然不完全[4] [5]。

表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)现象对于与产生表面等离子激元的金属薄膜相接触介质(或膜层)的折射率极其灵敏, 基于这种特性, SPR 传感检测技术倍受关注。SPR 气体传感已经被广泛应用于各个领域的分析检测中, 如环境检测中的甲醛, 二氧化碳浓度检测; 生物医疗中的血氧浓度检测等。SPR 气体传感技术具有广泛的应用前景和重要的社会意义。Eliran Talker 等人使用 SPR 效应与碱金属气室结合, 制作出了集成量子等离子体器件(IQPD)用于电磁诱导透明(EIT), 对 SPR 技术用于碱金属气室研究奠定了基础[6]。

本文提出利用表面等离子体共振来测定碱金属气室的折射率, 再根据气室中密度与折射率的关系计算出碱金属气室密度, 可以实现实时、准确、空间分布式的气室测量。首先根据所需测量的气室所在空间位置的原子数密度结合表面等离子体共振原理来设计测量系统的结构, 文中采用棱镜耦合角度调制型碱金属原子气室。通过泵浦光极化处于气室中的碱金属原子钾, 此时气态钾原子折射率受该气体的原子数密度影响。再利用表面等离子体共振效应中共振峰的横向位移变化测量极化状态下的钾原子气体折射率。根据共振峰的变化得到气室密度曲线。最后分析了不同的温度对系统的共振峰的影响和得到不同温度下的气室数密度关系。该测量方法可以适用于气室任意位置的密度测量, 具有实时和可调节位置探测的特征。并且相比于原子吸收倏逝波探测峰型变化更大, 该方法能直观得看到共振峰的移动, 峰的形状相当稳定。本文提出的方法为碱金属气室密度测量提供一种新的思路, 为表面等离子体共振技术用于

原子磁强计的发展做出了探索。

2. 原理

SPR 光学结构以金属介电界面为特色, 该界面容纳了 p 极化的电磁波, 该电磁波是贯穿界面的 SPW。由于入射过程中的能量转移导致反射光能的降低, 产生了强烈的光吸收。因此, 光谱将达到归因于所产生的类似于 SPW 的倏逝波。下列表达式提供了上述谐振条件:

$$k_{spw} = k_0 \left(\frac{\varepsilon_m n_s^2}{\varepsilon_m + n_s^2} \right)^2 \quad (1)$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是探测光波矢, k_{spw} 金属表面等离子体波波矢, 其中 ε_m 为金属介电常数, n_s 传感层折射率。这项技术有效地用于检测不同的变量, 因为该传播常数的匹配条件对介电常数内的光波动表现出高度的敏感性。

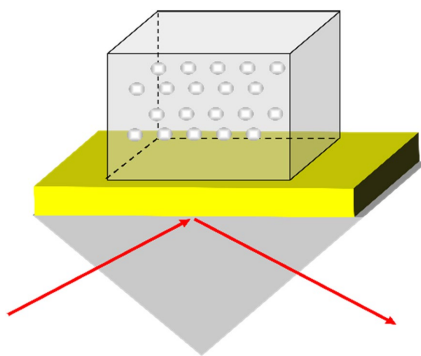


Figure 1. Schematic of (a) SPR principle

图 1. SPR 原理图

如图 1 所示, 在测量分析物的折射率的典型情况下, 使用 Kretschmann 型 SPR 装置进行。该系统中使用的棱镜的材料为 BK7, 其折射率由以下关系给出[7]:

$$n(\lambda) = \left(\frac{1.03961212\lambda^2}{\lambda^2 - 0.00600069867} + \frac{0.23179234\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0200179144} + \frac{1.01046945\lambda^2}{\lambda^2 - 103.560653} + 1 \right)^{1/2} \quad (2)$$

n 为 BK7 棱镜折射率, λ 为探测光波长。

由于其显著的吸收特性, 银和金通常用于 SPR 传感器结构中的传感领域。金属层介电常数的波长依赖关系采用 Drude 色散模型[8]。

$$\varepsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_c)} \quad (3)$$

其中 ε_m 金属的介电常数; ω_c 、 ω_p 和 ω 分别表示电磁波的碰撞频率、等离子体频率和探测光频率。

在原子磁强计中, 碱金属气室是其主要的结构。若把气室中的碱金属气体作为待测电介质, 对于处在密闭气室中的碱金属气体, 处于极化状态下的碱金属蒸气, 其折射率由下式给出[9]:

$$n(\nu) = 1 + \left(\frac{Nr_e c^2 f}{4\nu} \right) \text{Im}[\mathcal{V}(\nu - \nu_0)] \quad (4)$$

其中 n 为气体折射率, 是关于频率 ν 的函数, N 为碱金属气体的数密度, $r_e = 2.82 \times 10^{-15} \text{ m}$ 为经典电子半径, $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为真空中的光速, $f = \frac{1}{3}$ 为钾原子 D1 线振子强度, $\mathcal{V}$ 为 complex Voigt profile。当压力展宽 (Γ_L) 远大于高斯展宽 (Γ_G) 时, 可以使用复合洛伦兹线形 ($\mathcal{L}$) 近似代替 complex Voigt profile ($\mathcal{V}$)。

$$\mathcal{L}(\nu - \nu_0) = \frac{\Gamma_L/2\pi + i(\nu - \nu_0)/\pi}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Gamma_L/2)^2} \quad (5)$$

因此可以得到极化状态碱金属原子的折射率与密度对应关系。

3. 结果与讨论

采用 Kretschmann 结构, 在棱镜的底面上沉积一层稀薄的铬为黏附层, 增加其对金属的吸附能力[10]。其次沉积一定厚度的金来激发 SPW 形成表面等离子体共振。用环氧树脂将碱金属气室粘合在棱镜最上层, 最后将气室中充满钾金属蒸气, 形成完整的棱镜耦合型 SPR 测量系统。

根据上述原理设计用于测量气室表面附近的碱原子数密度模型。采用上述棱镜耦合型 SPR 结构, 使用 COMSOL Multiphysics 有限元法对该传感器进行理论分析。折射率相对较低棱镜更容易获得更高的灵敏度[11]。BK7 的折射率较低, 并且获取反射较为简单, 因此选择 BK7 作为传感器的 Kretschmann 型结构的耦合棱镜。在棱镜与金属膜之间沉积 3 nm 的铬, 使得 BK7 能和金膜更好地连接在一起。铬的折射率为 $3.9592 - i4.1936$ 。

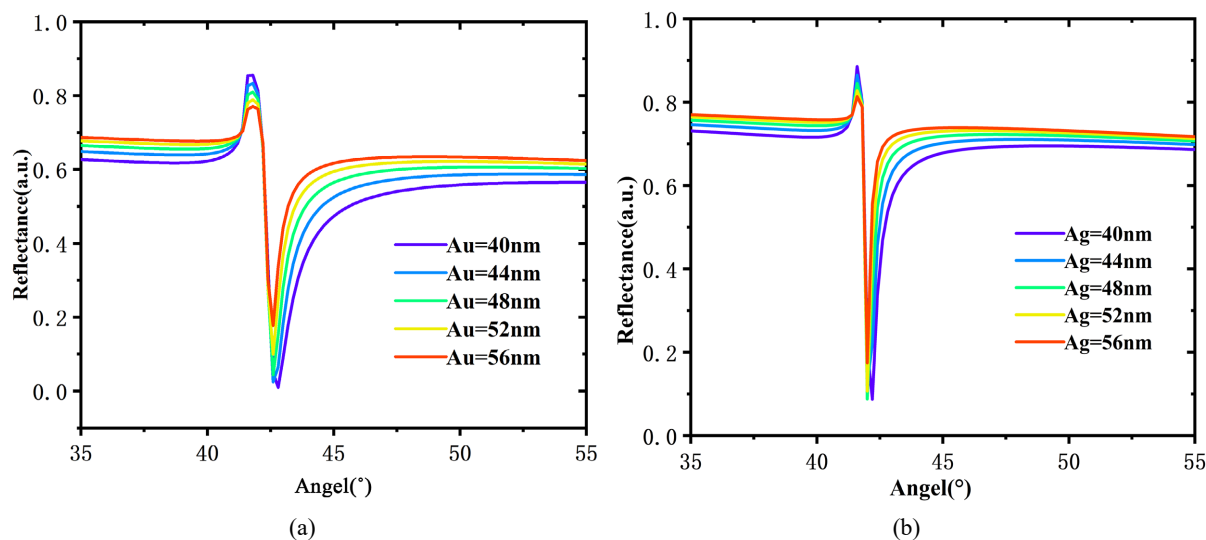


Figure 2. Spectrum of reflectance of the proposed SPR sensor at various thicknesses of (a) gold film and (b) silver film with an incident wavelength of 770.1 nm and a refractive index (RI) of 1.0

图 2. 在折射率为 1.00, 入射波长为 770.1 nm 的反射光谱, (a) 不同的金膜厚度, (b) 不同的银膜厚度

采用上述结构所得到的不同的金属材料 and 厚度的 SPR 反射光谱如图 2 所示。图 2(a) 为不同厚度的金膜的 SPR 反射谱, 从 40 nm 开始, 随着金膜厚度的增加, 共振峰越来越细锐。金层中能够激发出自由电子密度增加, 使得 SPR 效应有所提高, 信号对比度也增高。但是当金膜厚度继续变厚, 共振峰的开始变浅, 共振强度变小。这是因为金属厚度的增加会导致金薄层产生高阻尼损耗。当金层过厚时, 所产生的倏逝波难以穿透介质层, 阻碍了倏逝波与金属之间的相互作用, 从而削弱了金表面的等离子体共振

现象。

图 2(b)为不同厚度的银膜的 SPR 反射谱。与金膜相似的现象,随着银膜的厚度从 40 nm 到 56 nm 的增加,SPR 效应先增强后减小。因为银膜厚度的增加会导致银薄层产生高阻尼损耗。过厚的银层会阻碍倏逝波与金属之间的相互作用。对比金膜,银膜所产生的共振峰更加细锐,具有的半高全宽(FWHM)更加小。这是因为银的介电常数虚部较小,导致其表面等离子体共振的灵敏度显著高于金。但是银的性质相对来说不够稳定,在空气中容易被氧化。在用于测量碱金属气室密度的测量中,碱金属化学性质活泼,需要相对更加稳定的测量环境,性质不易变化的金更适合测量的需要。因此选择 48 nm 厚度的金膜作为金属敏感层能得到最好的效果。

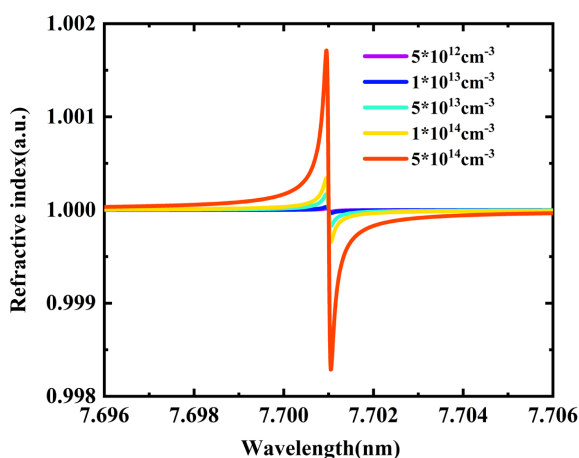


Figure 3. Calculated refractive index curves as a function of wavelength for various density of K

图 3. 不同密度的钾原子与波长

当泵浦光束的波长与钾原子 D1 线共振波长 770.1 nm 一致或者非常接近的时候,钾原子会被极化。气室中处于极化状态下的钾原子对不同的探测光显现出不同的折射率。不同数密度下的钾原子在压力展宽为 50 GHz 时的折射率与探测光波长的关系如图 3。当探测光的波长从 769 nm 接近钾原子 D1 线共振波长 770.1 nm 时候,被极化的钾原子的折射率先缓慢增大,再快速减小。并且随着密度的增加,钾原子对探测光折射率也越来越大。为了得到更高的折射率以便于测量,所以取其中折射率受到影响明显的波长 770.09 nm 波长的光作为探测光束。

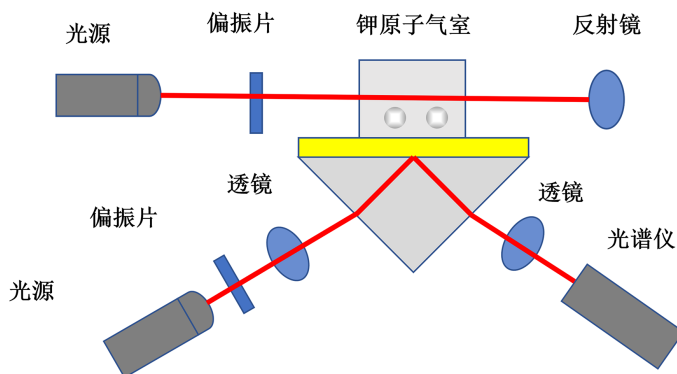


Figure 4. Optical path diagram of rubidium atomic density measurement principle

图 4. 钾原子密度测量原理的光路图

根据以上参数设计的钾原子密度探测光路如图 4 所示。770.1 nm 波长的泵浦光源经过起偏器进入到原子气室中使钾原子处于极化状态。由 770.09 nm 的探测光经过起偏器产生 P 偏振光以不同的入射角进入到棱镜模块, 由入射光全内反射产生的倏逝波和金膜-钾气室表面自由电子震荡产生的表明等离子体波满足波矢匹配条件, 则会发生表明等离子体共振。携带微小的共振区的信息的反射光由另一个透镜收集, 并聚焦到光纤耦合光谱仪, 实时得到钾蒸气的密度信息。

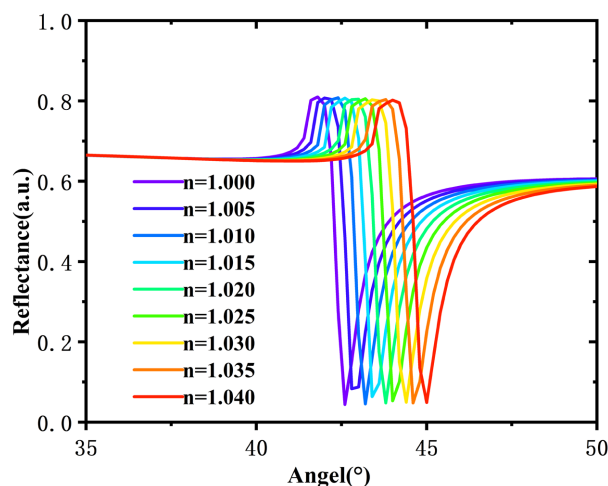


Figure 5. Resonance drift diagram with different K refractive index with an incident wavelength of 770.09 nm

图 5. 不同折射率的钾(K)蒸气下的反射率谱线, 探测光波长为 770.09 nm

不同的钾原子蒸气密度所对应的折射率不一样, 利用 SPR 效应对钾蒸气的折射率进行测量。不同数密度的钾蒸气对应产生 SPR 效应的共振角会相应变化。钾蒸气数密度越大, 那么 SPR 的共振角也越大。对折射率 n 从 1.00 变化到 1.04 的钾蒸气, 上述装置测量的 SPR 共振曲线如图 5 所示。随着钾蒸气折射率从 1.00 增加到 1.04, SPR 共振峰从 42.6° 增加到 45.0° , 灵敏度为 $60^\circ/\text{RIU}$ 。

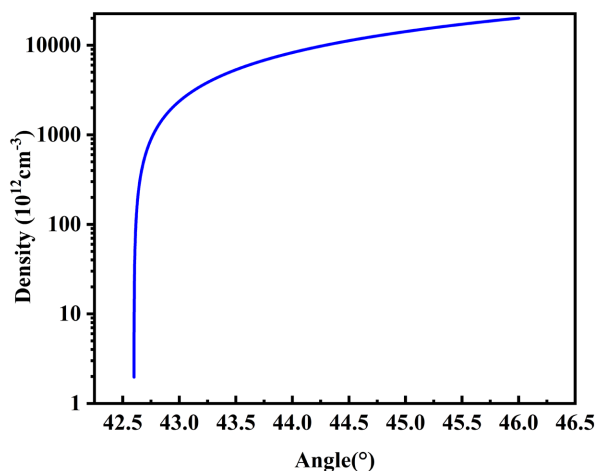


Figure 6. The relation curve of density and incident angle

图 6. 钾金属原子密度与共振角的关系曲线

由钾蒸气的数密度 N , 折射率 n 和共振角度 θ 之间对应的关系, 得到钾蒸气数密度与 SPR 共振角度的关系。对于共振角从 42.6° 到 46.5° 范围内对应的钾蒸气数密度曲线如图 6 所示。在共振角开始变化 1°

的范围内, 钾原子数密度从 $1.97 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 变化到 $6.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 符合 SERF 原子磁强计的数密度的一般范围。当共振角为 46° 时, 所对应的数密度为 $2.01 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 满足大部分磁强计的数密度范围。

4. 结论

综上所述, 本文提出了一种基于表面等离子体共振的实时、无接触、空间分布式的碱金属原子气室密度测量方法。我们从理论上分析推导了其工作原理, 并通过有限元法对传感器的结构进行详细分析, 在探测光波长为 770.09 nm , 金膜的厚度为 48 nm 时得到的测量系统灵敏度为 $60^\circ/\text{RIU}$ 。计算结果表明, 在所讨论的共振角度 42.6° 到 46.0° , 测量的钾金属密度从 $1.97 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 到 $2.01 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 覆盖大部分较为常见的碱金属原子气室的密度范围。

参考文献

- [1] Lu, Y., Zhao, T., Zhu, W., Liu, L., Zhuang, X., Fang, G., *et al.* (2023) Recent Progress of Atomic Magnetometers for Geomagnetic Applications. *Sensors*, **23**, Article 5318. <https://doi.org/10.3390/s23115318>
- [2] Li, R., Baynes, F.N., Luiten, A.N. and Perrella, C. (2020) Continuous High-Sensitivity and High-Bandwidth Atomic Magnetometer. *Physical Review Applied*, **14**, Article 064067. <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.14.064067>
- [3] Guo, Q., Li, X., Zhang, N., Lu, J., Ma, D., Li, Z., *et al.* (2022) The Space Density Distribution of Alkali Metal Atoms in a SERF Atomic Magnetometer. *IEEE Sensors Journal*, **22**, 6476-6481. <https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3146415>
- [4] Smullin, S.J., Savukov, I.M., Vasilakis, G., Ghosh, R.K. and Romalis, M.V. (2009) Low-Noise High-Density Alkali-Metal Scalar Magnetometer. *Physical Review A*, **80**, Article 033420. <https://doi.org/10.1103/physreva.80.033420>
- [5] Jau, Y., Kuzma, N.N. and Happer, W. (2002) High-Field Measurement of The ^{129}Xe -Rb Spin-Exchange Rate Due to Binary Collisions. *Physical Review A*, **66**, Article 052710. <https://doi.org/10.1103/physreva.66.052710>
- [6] Talker, E., Arora, P., Barash, Y., Stern, L. and Levy, U. (2018) Plasmonic Enhanced EIT and Velocity Selective Optical Pumping Measurements with Atomic Vapor. *ACS Photonics*, **5**, 2609-2616. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b01284>
- [7] Malitson, I.H. (1965) Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica. *Journal of the Optical Society of America*, **55**, 1205-1209. <https://doi.org/10.1364/josa.55.001205>
- [8] Sharma, A.K. and Gupta, B.D. (2006) Influence of Temperature on the Sensitivity and Signal-to-Noise Ratio of a Fiber-Optic Surface-Plasmon Resonance Sensor. *Applied Optics*, **45**, 151-161. <https://doi.org/10.1364/ao.45.000151>
- [9] Seltzer, S.J. (2008) Developments in Alkali-Metal Atomic Magnetometry. Ph.D., Princeton University.
- [10] Stern, L., Grajower, M. and Levy, U. (2014) Fano Resonances and All-Optical Switching in a Resonantly Coupled Plasmonic-Atomic System. *Nature Communications*, **5**, Article No. 4865. <https://doi.org/10.1038/ncomms5865>
- [11] Wu, L., Jia, Y., Jiang, L., Guo, J., Dai, X., Xiang, Y., *et al.* (2017) Sensitivity Improved SPR Biosensor Based on the MoS₂/Graphene-Aluminum Hybrid Structure. *Journal of Lightwave Technology*, **35**, 82-87. <https://doi.org/10.1109/jlt.2016.2624982>