

Theoretical Study on the Light-Propagation Property of an Optical Fiber Surface Plasmon Resonance Sensor*

YANG Jun^{1*}, ZHAN Lei¹, WU Song¹, TIAN Hao¹, LIU Linlin¹,
YANG Jing², GONG Zhaotao³, ZHENG Xiaolin¹

(1. Bioengineering College, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. Department of Information Engineering, Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China;
3. Chongqing Jinshan Science & Technology (Group) Co., Ltd, Chongqing, 401120, China)

Abstract: Optical fiber surface plasmon resonance (SPR) sensor is easy for miniaturization, which is usually used for developing portable analytical devices and can also be used for remote real-time detection. In this study, a tailor-made optical fiber is used to guide light in a novel optical fiber SPR sensor. Because light propagation within optical fiber is rather complex, experience based sensor design cannot insure its precision. Thus, according to the property of the optical fiber used in this study, a light-propagation model is set up and Fresnel equation is used to educe the relationship between the total reflectance of light and the light wavelength. Finally, theoretical SPR curve is drawn and resonance wavelength is achieved. This study provides an important theoretical base for the design and spectral analysis of this kind of optical fiber SPR sensor.

Key words: SPR; light-propagation model; optical fiber; resonance wavelength

EEACC: 4125; 7230E

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.10.012

光纤表面等离子体激元共振传感器中光传播特性的理论分析*

杨 军^{1*}, 战 磊¹, 吴 松¹, 田 浩¹, 刘琳琳¹, 杨 静², 官兆涛³, 郑小林¹

(1. 重庆大学生物工程学院, 重庆 400030;
2. 重庆通信学院军事信息工程系, 重庆 400035;
3. 重庆金山(科技)集团有限公司, 重庆 401120)

摘 要: 光纤表面等离子体激元共振传感器是一种易于小型化的 SPR 传感器, 常用于开发便携式传感检测设备, 也可用于远距离实时在线检测。在本研究中, 采用特制光纤作为导光介质来制作一种新的光纤 SPR 传感器。由于光纤中光传播相当复杂, 仅凭过往经验来设计传感器将不能保证其检测精度。因此, 针对本研究中光纤的特点, 建立了光纤中光传播模型, 并结合菲涅耳公式推导出该类光纤 SPR 传感器中光总反射系数与光波长的关系, 最终绘制出理论 SPR 曲线并计算出共振波长。研究结果为该类光纤 SPR 传感器的设计及光谱分析提供了重要理论依据。

关键词: 表面等离子体激元共振; 光传播模型; 光纤; 共振波长

中图分类号: TP212.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)10-1421-05

1902 年, Wood 发现光波通过光栅后频谱发生了小区域损失, 这一发现揭开了表面等离子体激元共振 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 技术发展的序幕^[1]。直到 1971 年, 德国物理学家 Kretschmann 以棱镜为基体并将几十纳米厚的金属薄膜直接覆盖在棱镜底部来实现 SPR 检测, SPR 技术才真正步入发展的快车道^[2]。

此后, 以棱镜为导光介质的 SPR 传感器在表面处理、化学、生物等领域得到广泛应用。1993 年, Jorgenson 等人利用光纤作为导光介质实现了 SPR 检测, 并在此基础上提出了两种基于光纤的 SPR 传感装置模型, 从而率先建立了实用化的光纤 SPR 传感技术^[3]。

与传统棱镜 SPR 传感器相比, 光纤 SPR 传感器

项目来源: 国家自然科学基金资助项目 (30870661; 30770569); 重庆市科技资助项目 (CSTC2009AB5081; CSTC2009BB5180; CSTC2009DA0001-B17; CSTC2010AC5029); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目资助 (NCET-09-0842)

收稿日期: 2010-03-10

修改日期: 2010-06-21

有很多优点,如易于小型化、可用于远距离实时在线检测等^[4]。但是,现有光纤 SPR 传感器的检测很容易受到光色散的影响,从而导致检测精度不高^[5]。因此,本文设计了一种新型的光纤 SPR 传感器,希望其能够抑制光色散的影响,提高分析精度。由于光纤结构的特殊性,光纤中光的传播过程十分复杂,如果仅仅依靠经验来进行光纤 SPR 传感器的设计,可靠性和精度难以保障。针对这种新的光纤 SPR 传感器,本文希望建立相应的理论分析方法,通过理论研究结果来指导仪器设计、实验研究和结果分析。在棱镜 SPR 传感器的理论分析中,通常采用菲涅耳(Fresnel)公式^[6]进行计算。在光纤中,光的每次全反射的情况与棱镜中没有区别,Fresnel 公式也同样适用。因此,本文的理论分析主要是建立在 Fresnel 公式基础上。由于光纤 SPR 传感器的输出是数次 SPR 现象综合的结果,并且包含了很多传播模式。因此,本文结合光在光纤中的传播状态,在 Fresnel 公式的基础上建立了新的光纤 SPR 传感器的特定理论分析方法,并给出了实际算例。该理论研究结果将有助于光纤 SPR 传感器的结构设计和检测结果分析。

1 SPR 原理

通常情况下,金属表面的电子处于平衡状态,当有外界扰动时,平衡被打破,使得电子浓度呈现梯度分布,并形成局限于表面的电子疏密波,这种波称为表面等离子体波^[7](Surface Plasma Wave, SPW)。当外界光透过介质照射到金属表面并在介质与金属界面发生全反射时,光以倏逝波的形式进入到金属内,在金属下表面,倏逝波的能量将被 SPW 吸收并产生共振,使得反射光的能量减少,这种共振现象被称作表面等离子体激元共振。我们知道电磁波发生共振的条件就是两个波具有相同的频率和波矢,且传播方向一致,这就导致只有 P 偏振光才能产生 SPR 现象^[8]。

2 棱镜 SPR 传感器的理论计算

棱镜 SPR 传感器根据调制方式的不同主要分为角度调制型和波长调制型,其中角度调制型更为常见。而光纤型 SPR 传感器由于角度改变上的困难,主要采用波长调制型,因此,本文主要讨论波长调制型 SPR 传感器的理论计算方法。

以目前广泛应用的 Kretschmann 型(图 1)棱镜 SPR 传感器为例。该模型主要由导光介质层(棱镜),金属层和环境介质层构成。通常,传感检测的反应在金属层和环境介质层之间的界面进行。在折射率为 n_0 的导光介质中,光波在 x, z 方向上的波矢

分量为^[9]:

$$k_{x0} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_0} \sin \theta \quad (1)$$

$$k_{z0} = \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 \varepsilon_0 - k_{x0}^2} \quad (2)$$

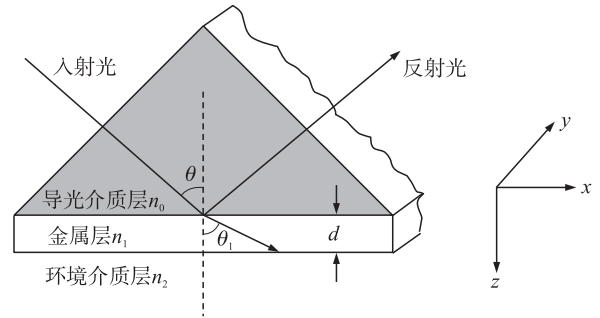


图 1 Kretschmann 型棱镜 SPR 传感器的基本模型

在折射率为 n_1 的金属层中,光波在 z 方向上的波矢分量为:

$$k_{z1} = \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 \varepsilon_1 - k_{x0}^2} \quad (3)$$

在折射率为 n_2 的环境介质中,光波在 z 方向上的波矢分量为:

$$k_{z2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 \varepsilon_2 - k_{x0}^2} \quad (4)$$

根据 Fresnel 公式^[6]:

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} \quad (5)$$

$$r_{\parallel} = \frac{n_2 \cos i_1 - n_1 \cos i_2}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \quad (6)$$

$$t_{\perp} = \frac{2n_1 \cos i_1}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} \quad (7)$$

$$t_{\parallel} = \frac{2n_1 \cos i_1}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \quad (8)$$

其中, r, t 分别为振幅反射比和振幅透射比, i_1, i_2 分别为入射角和折射角,可得出图 1 中两个界面的 P 光反射系数为:

$$r_{0,1} = \frac{\varepsilon_0/k_{z0} - \varepsilon_1/k_{z1}}{\varepsilon_0/k_{z0} + \varepsilon_1/k_{z1}} \quad (9)$$

$$r_{1,2} = \frac{\varepsilon_1/k_{z1} - \varepsilon_2/k_{z2}}{\varepsilon_1/k_{z1} + \varepsilon_2/k_{z2}} \quad (10)$$

进而可以得出全反射情况下 P 光的总反射系数为:

$$r = \frac{r_{0,1} + r_{1,2} e^{2ik_{z1}T}}{1 + r_{0,1}r_{1,2} e^{2ik_{z1}T}} \quad (11)$$

其中, T 为金属层的厚度, $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为棱镜、金属、环境介质的介电常数, θ 为入射角, c 为光速, λ 为光波长。

3 光纤中光传播模型

在我们新设计的光纤 SPR 传感器中,采用的光纤为石英内芯的多模阶跃光纤,光纤的光导入面切割成一个斜面(图 2),这能够使入射光能够以垂直入射的方式导入到光纤中,并在光纤中以全反射的方式传播。为了使得光能够在光纤内传播,要求光纤端口的切角 $\chi > \theta_c$ (θ_c 为光纤内光全反射的临界角)。在光纤 SPR 传感器中常常采用波长调制方法,光源采用多波长的复合光,也因此常出现色散干扰。当复合光以垂直入射的方式照射到两种不同介质的交界面时,是不会发生色散现象的。因此,采用这种光入射结构理论上可以有效的抑制光的色散对光纤 SPR 传感器的影响。

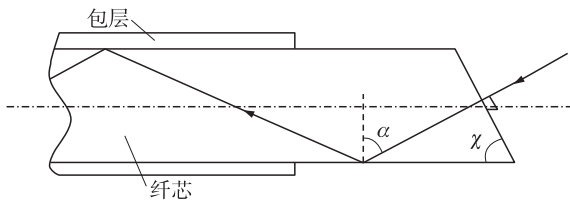


图 2 光纤端口结构及光在光纤中的传播

在建立光传播模型之前,假设入射光为均匀的平行光,并以垂直入射的方式入射到光纤内部。进入到光纤内部的光分为子午光线和斜光线,其中斜光线在光纤中是以螺旋的方式传播的(图 3)。由于入射光的能量大部分集中在斜光线,因此本文只讨论斜光线在光纤内的传播,而子午光线也可以作为斜光线的一种极端情况。图 4 是两次相邻全反射间的斜光线示意图。其中 θ 为光线与光纤中心轴(z 轴)的夹角; ψ 为光全反射时的入射角; m_0 、 m 分别为两次全反射的法线; β 为法线 m 与 x 轴的夹角,两个法线是关于 y 轴对称的; C_0C 为斜光线。根据光纤纤芯的对称性及光反射的对称性,可知同一条光线在光纤内传播时,不论位置如何,只要是相邻全反射间的光线都可以等效为图 4 所示情况。根据计算可知,图 4 中的 θ 、 ψ 、 β 角存在固定

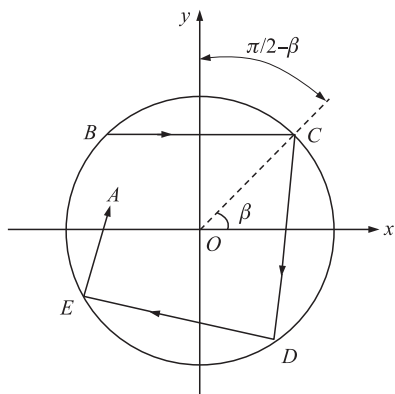


图 3 斜光线传播轨迹在截面上的投影

关系^[10]:

$$\cos\psi = \sin\theta\cos\beta \quad (12)$$

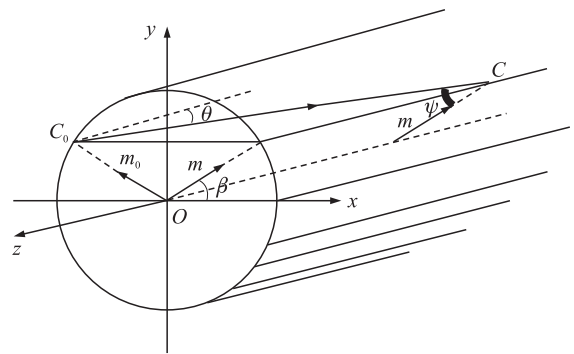


图 4 两次相邻全反射间的斜光线

将斜光线 C_0C 投影于 xOy 平面,如图 3 中的线段 BC 。在 BCC_0 面中,平行于 C_0C 光线都可以等效为图 4 所示的情况。由于研究中采用的外界光是平行光,并且以垂直入射的方式导入光纤,这种折射没有角度的变化,根据光的可逆性可以得出结论:照射到入射面上的光,当其入射点到 x 轴距离相同时,入射到光纤内的光有相同的模式,即光线在光纤内以全反射方式传播时有相同的入射角。如图 5 所示,光纤被切割后,入射面变为椭圆形(其中 x 轴与椭圆长轴重合, y 轴与椭圆短轴重合)。因此,可以根据外界光在入射面上的入射位置计算出光在光纤内的传播情况。由于外界光的垂直入射以及光的可逆性,我们可以得出图 4 中 θ 与图 2 中 χ 的关系:

$$\theta = 90^\circ - \chi \quad (13)$$

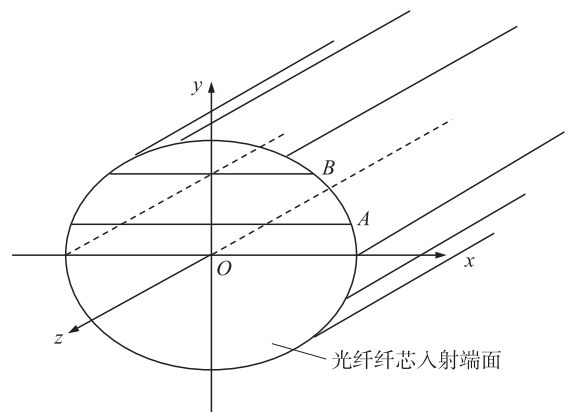


图 5 光纤切割后入射界面示意图

在图 4 中, β 直接与光线投影在界面的位置相关,即与投影到 x 轴的距离有关:

$$\beta = \arcsin(d/r) \quad (14)$$

其中, d 为投影到 x 轴的距离, r 为光纤纤芯的半径。

由式(12)、(13)和(14)可以得到光纤内光模式分布与外界光的入射位置的关系(图 6)。根据图 6

可以得出一个结论,随着光纤端口的切角 χ 的变大,曲线越平缓。并且光入射点越接近纤芯中心,曲线随距离的变化越小。当均匀的平行光垂直的照射到光纤端口时,入射光大部分能量集中在图5中 x 轴附近(通过图5中光入射面的面积分布可以得出),而这部分光在光纤内部全反射入射角的变化比较平缓。当增大切角 χ 时,可以减少由于光纤入射面结构所引起的芯内全反射入射角的变化。

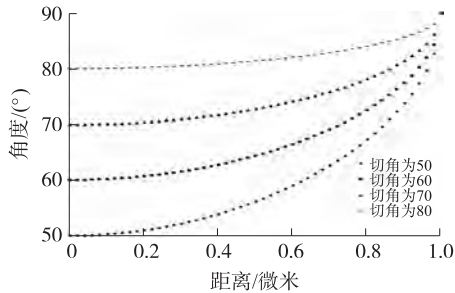


图6 芯内全反射入射角 ψ 与距离 d 的关系(假设纤芯半径为1)

光纤 SPR 传感器所采用光纤的芯径通常为 300 ~ 600 μm 。由于光纤很细,因此光在传感区将发生多次全反射,传感器的输出是多次 SPR 效应累加的结果,光纤中各种模式的光在传感区的全反射次数 N 可以通过下式得出:

$$N = \frac{l}{2r\cos\beta\cot\theta} \quad (15)$$

其中, l 为传感部长度。在理论计算仿真研究中,假定传感器的传感部长度为 1 cm,纤芯半径为 300 μm 。通过式(13)、(14)和(15)可以得出 N 与 d 的关系(图7)。结果表明,光纤端口切角越大,光线在传感区全反射的次数越多,即同一束光发生 SPR 现象的次数越多。而通过对棱镜 SPR 传感器的研究发现:当同一复合光束在同一条件下经历多次 SPR 效应后,会导致光能量过分衰减,使得 SPR 曲线变得过于平滑,难以判断共振点的位置,从而降低 SPR 传感器的分辨率。

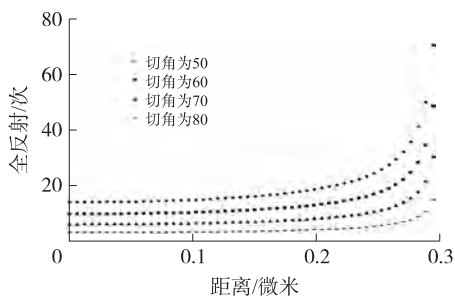


图7 全反射次数 N 与距离 d 的关系

4 光纤 SPR 传感器的理论计算

当光纤中光传播模型建立以后,可以分析出光

以垂直入射方式导入到光纤时,光全反射传播的入射角以及传感区光全反射次数与距离的关系。下面将根据这一模型,对拟开发的光纤 SPR 传感器进行理论分析并建立相应的理论模型。

根据图3可知,在我们的设计中,光线在光纤中是以螺旋方式沿着光纤内芯传播的,在光纤 SPR 传感器的传感区域,光将经历多次全反射,每次全反射的法线方向皆不同,其方向如图4中 m_1 和 m ,法线经过光纤纤芯轴线并以一定角度旋转。由于这种旋转的效果,使得光的各个方向的分量都参与到 SPR 现象的产生中。这表明,本文所提出的光纤 SPR 传感器的设计不用再考虑 P 光和 S 光的分离。

光纤 SPR 传感器的理论计算也是根据 Fresnel 公式进行的,只是在棱镜 SPR 传感器理论计算的基础上考虑了光纤内光传播的特点,从而对理论公式进行改进。在光纤中,SPR 曲线是光经历多次 SPR 现象后累加的结果,并且在传感区全反射的入射角不是固定的。那么在光纤 SPR 传感器的理论计算中必须考虑到两个问题:1、传感区光全反射的次数;2、传感区全反射入射角的分布。

根据反射次数的定义,可知:

$$r = \frac{I_r}{I_0} = \frac{I_1}{I_0} \times \frac{I_2}{I_1} \times \cdots \times \frac{I_n}{I_{n-1}} = r_1 \times \cdots \times r_n \quad (16)$$

其中: r 为总反射系数, r_i ($i = 1, \dots, N$)为第 i 次反射的反射系数, I 为光强。当外界条件相同时多次反射的反射系数为每次反射反射系数的 N 次方。

通过式(13)、(14)和(15)可知全反射反射次数 N 与 d 的关系;根据式(12)、(13)和(14)可知全反射入射角 ψ 与距离 d 的关系。当外界复合光均匀入射到光纤端口时,光纤内各个模式的光能量与 d 也存在固定关系,且一个模式的光对应一定的传感区内全反射次数和全反射入射角度。因此,可以得出光纤 SPR 传感器的理论计算模型为:

$$R(\psi, N, I_e, d, \lambda) = \sum r^{N(d)}(\psi, \lambda) I_e(d) \quad (17)$$

其中: I_e 为不同模式光的能量分布。此能量分布根据各种模式的光能量占总能量的百分比而得出,这个百分比可通过相同模式光入射区域面积占光纤端口总面积的多少拟合而来。

下面给出一个实际算例:假设在光纤局部区域镀上银膜作为敏感层,银的色散公式^[11]为:

$$e_s = \left(\frac{-5.1596}{10^5} \times \lambda^2 - 0.0033253 \times \lambda + 56.2403 \right) + j \times \left(\frac{3.1776}{10^6} \times \lambda^2 - 0.002018 \times \lambda + 0.54037 \right) \quad (18)$$

光纤纤芯的色散公式^[12]为:

$$n = \frac{1.1399}{10^{10}} \times \lambda^3 + \frac{2.9294}{10^7} \times \lambda^2 - \frac{2.6420}{10^4} \times 10^4 + 1.5356 \quad (19)$$

假设银膜厚度为 40 nm,光纤纤芯直径为 600 μm,环境介质折射率为 1.3。可以得出不同的光纤端口切角下的 SPR 曲线(图 8)。仿真结果表明,当光纤端口切角变小时,会造成 SPR 曲线波谷不够尖锐,当有外界干扰时,会影响传感器检测的分辨率。

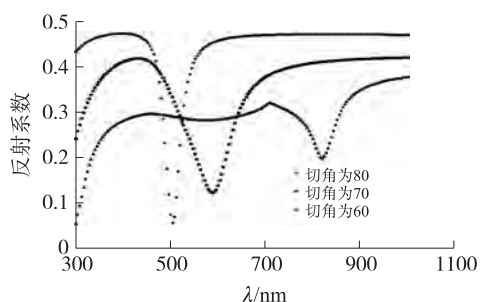


图 8 光纤 SPR 传感器的理论曲线

5 结论

本文为一种新型的光纤 SPR 传感器建立了光传播模型,并在此模型基础上针对该光纤 SPR 传感器进行了理论分析、计算及仿真研究,从而建立了一套相对完整的理论分析方法,为该类光纤 SPR 传感器的设计及相关器件的选取提供了理论参考依据。该研究结果有望提高传感器设计的成功率,并为 SPR 数据的分析提供理论参考。



杨 军(1974 -),男,博士,现为重庆大学生物工程学院副教授,主要研究方向为生物传感器、微流控生物芯片、生物微系统. bioyangjun@cqu.edu.cn;

参考文献:

- [1] Wood RW. On a Remarkable Case of Uneven Distribution of Light in a Diffraction Grating Spectrum[J]. Philosophical Magazine, 1902, 4(21): 396 - 402.
- [2] Kretschmann E. The Determination of the Optical Constants of Metals by the Excitation of Surface Plasmons[J]. Zeitschrift für Physik, 1971, 241(4): 313 - 324.
- [3] Jorgenson RC, Yee SS. A Fiber-Optic Chemical Sensor Based on Surface Plasmon Resonance[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 1993, 12(3): 213 - 220.
- [4] Yanase Y, Araki A, Suzuki H, et al. Development of an Optical Fiber SPR Sensor for Living Cell Activation[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2010, 25(5): 1244 - 1247.
- [5] 郝鹏,吴一辉,庄须叶. SPR 传感芯片的理论与实验研究[J]. 传感技术学报,2008,21(2):211 - 214.
- [6] 田芊,廖延彪,孙利群. 工程光学[M]. 清华大学出版社,2006.
- [7] 隋森芳,肖才德,杨军. 表面等离子体激元共振生物传感器[M]. 上海科学技术出版社,2008.
- [8] 张维,徐宁,谢海燕,等. 基于二元光学的多通道 SPR 传感芯片及其系统设计[J]. 传感技术学报,2009,22(8):1099 - 1104.
- [9] Spackova B, Homola J. Theoretical Analysis of a Fiber Optic Surface Plasmon Resonance Sensor Utilizing a Bragg Grating[J]. Optics Express, 2009, 17(25): 23254 - 23264.
- [10] Wen BL. The Effects of Polarization of the Incident Light-Modeling and Analysis of a SPR Multimode Optical Fiber Sensor[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2000, 84(3): 198 - 204.
- [11] Ordal MA, Long LL, Bell RJ, et al. Optical Properties of the Metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the Infrared and Far Infrared[J]. Applied Optics, 1983, 22(7): 1099 - 1120.
- [12] Jorgenson R C. Surface Plasmon Resonance Based Bulk Optic and Fiber Optic Sensors[D]. University of Washington, 1993.



战 磊(1986 -),男,硕士(在读),现就读于重庆大学生物工程学院,主要研究方向为 SPR 传感器, zhanlei.zsu@126.com。