

# 表面等离子体共振的热致折射率

刘晓菲<sup>1</sup> 张学如<sup>2</sup> 兰国强<sup>2</sup> 李淑青<sup>1</sup> 刘 阳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>太原工业学院理学系, 山西 太原 030008

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 激光束照射液体产生的热累积效应会引起其折射率变化,从声光方程出发分别分析了液体瞬态折射率与稳态热致折射率产生的机理,研究了透镜焦距以及入射波长对去离子水折射率的影响。利用表面等离子体共振检测系统对温度改变的高度敏感性,建立了一种新型的液体棱镜检测系统,数值模拟了不同功率下去离子水的稳态共振曲线,当功率变化为 0.7 W 时,其折射率变化为  $1.4 \times 10^{-3}$ 。采用功率可调的 980 nm 的连续激光器对去离子水的热光效应进行了实验研究,得到了其稳态热致折射率随功率的变化关系,当功率变化 0.7 W 时,其折射率变化为  $3.35 \times 10^{-3}$ ,最后剖析了实验与理论之间误差的可能来源。

**关键词** 表面光学; 棱镜; 共振; 表面等离子体; 热光效应

**中图分类号** O437 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0524001

## Thermal Index Based on Surface Plasmon Resonance

Liu Xiaofei<sup>1</sup> Zhang Xueru<sup>2</sup> Lan Guoqiang<sup>2</sup> Li Shuqing<sup>1</sup> Liu Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Science, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan, Shanxi 030008, China

<sup>2</sup>Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** The thermal accumulative effect of liquids induced by laser illumination gives rise to the refractive-index change. On the basis of photo-acoustic equations, the mechanism on the transient-state and steady-state thermal indexes of the liquids can be analyzed, respectively. Moreover, the effects of the incident wavelength and focal length on the refractive index of deionized water are studied. Using surface plasmon resonance detection system that is highly sensitive to temperature alteration, an original liquid prism detection system is set up, and the resonance curve of the deionized water at various power levels is numerically simulated from which refractive-index change of  $1.4 \times 10^{-3}$  in the case of power change of 0.7 W is obtained. Then the experimental researches on thermo-optical effect of the deionized water are carried out by means of continuously operating laser of 980 nm wavelength with adjustable power levels, and the dependences of steady-state thermal index on different power levels are obtained. It is observed that the refractive-index change reach  $3.35 \times 10^{-3}$  when power change is 0.7 W. Finally, possible error sources between the experimental results and the theoretical simulation are discussed.

**Key words** optics at surfaces; prisms; resonance; surface plasmons; thermo-optical effect

**OCIS codes** 240.6680; 230.5480; 260.5740; 190.4870

## 1 引 言

表面等离子体共振(SPR)技术具有良好的局域性<sup>[1-2]</sup>、快速的近场增强特性与超高的灵敏性等优势,因而可广泛应用于化学分析、生物检测方面<sup>[3-4]</sup>以及相关物理量测定等领域<sup>[5-7]</sup>。通过优化设计 SPR 耦合结构与相应的检测方法<sup>[8-9]</sup>,可以提高共振角、共振波长、光强与相位差的测量灵敏度,从而提高 SPR 传感器的性能<sup>[10]</sup>。

然而高灵敏传感器对环境温度的变化极为灵敏<sup>[11-12]</sup>。复杂的环境温度会引起共振角度与共振波长的漂移<sup>[13-14]</sup>,从而降低 SPR 系统的灵敏度以及限制其应用。因此消除对外界温度变化的敏感性是实现 SPR 高

收稿日期: 2015-12-03; 收到修改稿日期: 2016-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(11374079)、院青年科学基金(2015LQ14)、太原工业学院青年(后备)学科带头人支持计划

作者简介: 刘晓菲(1988—),女,硕士,助教,主要从事表面等离子体共振方面的研究。E-mail: liuxiaofei0354@163.com

精度传感的关键问题<sup>[15-16]</sup>。近年来,研究者采用适宜的温度补偿和温度校准方式来消除温度对传感器测量结果的影响<sup>[17-18]</sup>。Gentleman 等<sup>[19]</sup>采用波长调制的方法去检测氯化钠,发现温度使共振波长产生了漂移,故提出应该对测量结果进行校准来减小温度对测量的影响,然而,他们却没有进一步研究共振波长变化和温度之间的关系。Brantzen 小组<sup>[20]</sup>建立一种新颖结构的 SPR 传感器结构来检测待测液体的热光效应,为了精确地测量所吸收的热,他们把光栅耦合器的金属层放在一个超薄的薄膜上,而热传感器则放置在相应的热敏感区域,热传感器的测量灵敏度受制于环境温度,为减少外界温度变化对传感器的影响,对实验装置进行了优化处理。2013 年,Tran 等<sup>[21]</sup>通过理论与实验研究了 SPR 热效应,发现基于温度的 SPR 的角位移主要取决于纳米粒子的尺寸,并得出 SPR 的热效应受聚合物的动态性影响很大,为控制温度对 SPR 特性的影响奠定了基础。

与此同时,由激光束照射引起的温度变化也会对 SPR 传感器产生影响,研究者们采用恒温装置或低功率的激光探头来减小温度带来的负面影响,从而提高测量的灵敏度。Xiao 等<sup>[22]</sup>研究得出 SPR 角度的移动和共振深度的变化不仅与激光的功率有关,而且与金属和溶液介质界面的热扩散有关。他们提出了一些提高测量精度的方法,利用测量液体快速流动缓解热扩散和减小热漂移;对于静止不流动的液体,应采用低功率的激光探头或者减少激光照射时间。同年,Davil 等<sup>[23]</sup>在 SPR 共振技术的基础上,采用低功率的激光探头,对无相互作用的微流体进行外部加热,通过理论计算和实验探测确定液体的热光系数的精确度优于  $1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。随后,Kaya 等<sup>[24]</sup>对通信波段在金属/空气介质界面处受光热影响的表面等离子体传播进行了研究。通过调制连续波或者调 Q 纳秒抽运激光器,金膜中由温度引起的欧姆损耗会影响表面等离子体传播,使用特殊光纤对装置来精确测量光热致调制下 SPR 信号的调制深度。尽管这些研究能有效控制或者补偿温度对 SPR 传感器精度的影响,但是却很少考虑由激光器照射积累引起的温度改变对吸收介质的热光性质与折射率变化的影响。另一方面,基于光声方程,研究者通过研究介质随温度变化的性质获得介质的热光性质,比如利用 Z 扫描原理测量介质的热光系数。

本文从声光效应方程出发,在恒定的外界环境温度下,分析了去离子水在连续激光的照射下发生的局域温度变化所导致的折射率变化。以改进的液体棱镜结构为 SPR 传感器的主要激发装置,研究了液体棱镜受人射光功率与聚焦透镜调制的瞬态和稳态热光效应的理论机制。利用热光效应所致的共振漂移现象,分析了去离子水的热致折射率与入射光功率之间的关系,并通过进一步的实验证明了理论的正确性。

## 2 检测系统热光效应分析

### 2.1 热致折射率产生的理论模型与数值模拟

当激光束照射到液体中,通过吸收能量引起液体内部产生温度变化为  $\Delta T$ ,其热传导的扩散方程为<sup>[25-27]</sup>

$$\rho_0 C_p \frac{\partial}{\partial t} \Delta T - \kappa \nabla^2 \Delta T = \alpha I, \quad (1)$$

式中  $\rho_0$  为溶液的密度,  $C_p$  表示恒压比热容,  $\kappa$  为样品的热导率,  $\alpha$  表示样品的吸收系数,  $I$  表示液体中的光强分布。由于热扩散时间比激光脉冲要大得多,液体中积累的热量几乎来不及扩散,因而在 (1) 式中忽略扩散项的影响<sup>[28]</sup>,因此温度的变化  $\Delta T$  可以表示为

$$\Delta T(r, z, t) = \frac{1}{\rho_0 C_p} \int_{-\infty}^t \alpha I dt. \quad (2)$$

当脉冲的前沿 ( $t = -\infty$ ) 与溶液样品相互作用,  $\Delta T = 0$ 。激光器通过样品所产生的热致折射率的变化可表示为

$$\frac{\partial^2 \Delta n_{\text{th}}(r, z, t)}{\partial t^2} - \nu_s^2 \nabla^2 [\Delta n_{\text{th}}(r, z, t)] = \left( \frac{dn}{dT} \right) \nu_s^2 \nabla^2 [\Delta T(r, z, t)], \quad (3)$$

式中  $dn/dT$  代表热光系数,  $\nu_s$  表示液体中的声速,  $n_{\text{th}}$  代表热致折射率,  $n$  代表总的折射率,其值等于线性折射率与热致折射率之和,  $\Delta n_{\text{th}}$  表示热致折射率变化。对于激光与液体溶液相互作用,将 (2) 式代入 (3) 式中可得到瞬态热致折射率变化<sup>[28]</sup>。热棱镜形成的时间为光束在液体中通过整个光斑所需时间  $\tau_{\text{ac}} = \omega_0 / \nu_s$ , 其中  $\omega_0$  表示激光束腰半径。

在激光的脉冲宽度  $\tau_p$  范围内,当  $\tau_p < \tau_{ac}$  时,热透镜还未形成,产生瞬态热光效应,此时热致折射率的变化可通过 (3) 式求解。当连续激光器入射时 ( $\tau_p \gg \tau_{ac}$ ),产生稳态热光效应。在此情况下,热扩散所需时间比较长,热致折射率的时间微分比折射率横向变化要小得多,由此可得稳态热致折射率变化<sup>[29]</sup>:

$$\Delta n = (dn/dT) \Delta T. \quad (4)$$

从(4)式可以看出,在稳态情况下折射率变化与温度变化成正比,因此,液体的稳态热致折射率可以写为  $n(r, t) = n_0 + (dn/dT)\Delta T$ ,其中  $n_0$  为液体的线性折射率。当连续激光入射到样品介质中时,样品介质持续的吸收激光能量,使高温区域的粒子数不断扩散到低温度区域,形成一定的温度梯度,相比于纳秒脉冲光产生的瞬态热致效应,在稳态条件下每单位时间内热积累效应明显,从而产生较大的折射率变化。以下主要研究了在不同条件下去离子水的热致折射率变化以及不同参数对热致折射率的调制。

图 1(a)为入射光能量为  $5 \mu\text{J}$ 、波长为  $980 \text{ nm}$  的纳秒激光脉冲通过  $300 \text{ mm}$  的透镜聚焦到去离子水中,瞬态折射率变化约为  $10^{-6}$ 。当激光束通过样品时,液体中温度梯度的改变直接引起去离子水折射率的变化形成热透镜,由于热透镜的影响,实际光斑焦点向后移动,所以热导致的折射率在离焦点处达到最大值。在相同条件下(功率为  $50 \text{ mW}$ ),连续激光入射到去离子水中时,则会引起稳态热畸变效应,如图 1(b)所示。从图中得知,在远离透镜焦点时热致折射率变化在一定范围内逐渐增大,在  $0.294 \text{ mm}$  处折射率变化达到最大。从几何原点到透镜实际焦点距离为  $0.294 \text{ mm}$  处,去离子水的折射率变化为  $1.16 \times 10^{-5}$ 。通过数值模拟,稳态效应的热扩散比瞬态效应的热扩散更明显,所以稳态折射率变化比瞬态条件下所致的折射率变化大一个量级。

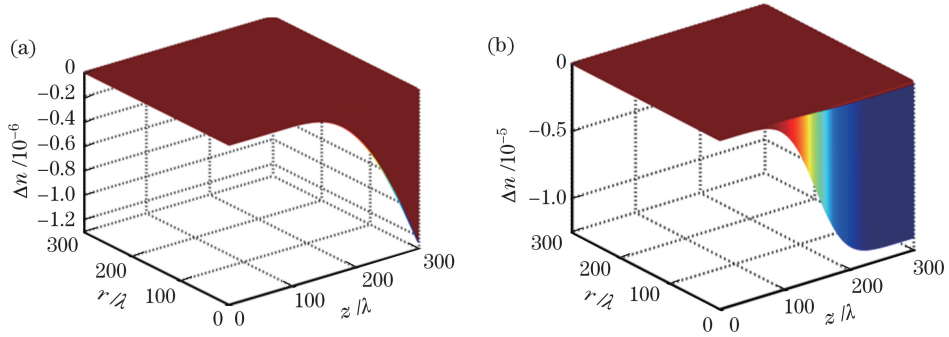


图 1 (a)瞬态热致折射率变化;(b)稳态热致折射率变化

Fig. 1 (a) Transient-state thermal index change; (b) steady-state thermal index change

影响热致折射率的因素主要包括入射光的波长和聚焦透镜的焦距,以下以稳态为例研究了热致折射率的变化规律。如图 2 所示,分别模拟了去离子水稳态折射率与入射光波长和透镜焦距关系的三维图和等高图,其他条件与图 1 一致。从图中可得出当波长一定时,随着透镜焦距的增大折射率变化逐渐减小;而当焦距一定时,随着波长的增大折射率的变化也趋于减小。选取  $532 \text{ nm}$  波长激光入射,当透镜的焦距从  $75 \text{ mm}$  增大到  $300 \text{ mm}$  时,折射率变化值从  $-6.339 \times 10^{-5}$  变化到  $-1.58 \times 10^{-5}$ ,当选取焦距为  $75 \text{ mm}$  的透镜,入射波长从  $532 \text{ nm}$  变化到  $1064 \text{ nm}$  时,折射率变化值从  $-6.339 \times 10^{-5}$  变化到  $-3.91 \times 10^{-6}$ 。

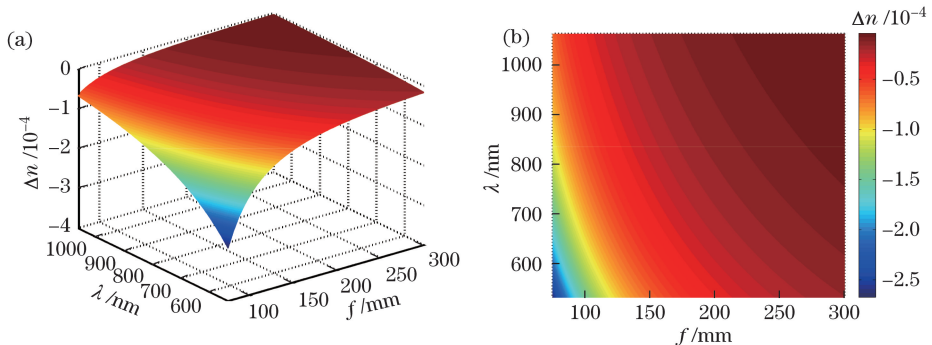


图 2 去离子水的稳态折射率随透镜焦距和波长的变化

Fig. 2 Steady-state thermal index change of deionized water as a function of focal length and wavelength

在连续光入射下,改变入射波长与焦距相当于调节入射激光的功率。为了更直观地观察稳态条件下的热光效应,图 3 模拟了去离子水在波长为 980 nm 的连续激光入射下,通过改变入射光的功率所引起的介质中的折射率变化。当入射光的功率  $P$  从 0.1 mW 增加到 1 W 时,折射率的变化随之变大。当入射光功率为 10~50 mW,折射率变化的量级为  $10^{-5}$ ;当入射光功率在 60~0.5 W,折射率变化的量级达到  $10^{-4}$ ;当入射光功率大于 0.5 W,折射率的变化量级要大于  $1 \times 10^{-3}$ ;当入射光功率达到 1.0 W 时,折射率的变化量级约为  $1.96 \times 10^{-3}$ 。由此得出结论,入射光的功率越大,去离子水的折射率变化越明显,水吸收激光能量产生的热效应越大。这就意味着,通过改变入射光功率,热致效应对折射率的影响愈大,同时 SPR 共振角的移动趋势也更容易区分。

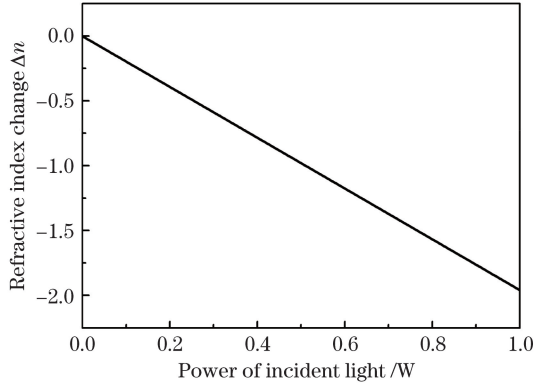


图 3 去离子水折射率变化随入射光功率的变化(入射波长为 980 nm;透镜焦距为 75 mm)

Fig. 3 Refractive-index of deionized water varies with various input power levels  
(incident wavelength: 980 nm; focal length: 75 mm)

## 2.2 新型实验检测系统的搭建与理论模拟

在传统的 Otto 和 Kretschman 棱镜耦合激发表面等离子体波(SPW)的结构基础上,设计了新型的液体棱镜结构<sup>[30]</sup>,如图 4 所示。当入射光波满足波矢匹配时,同样可激发 SPW 的产生,其表达式为

$$k_p \sin\theta_2 = k_p \frac{n_a \sin\theta_1}{n_p} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_0}{\epsilon_m + \epsilon_0}}, \quad (5)$$

式中  $\epsilon_m$  与  $\epsilon_0$  分别表示空气中折射率和相对介电常数, $n_a$  与  $n_p$  分别为液体与玻璃的折射率, $k_p$  代表玻璃中的光波数。改进后的多层膜结构使得金属表面与待测物质不再直接接触,故而减小了金属吸收光波能量对待测液体热致折射率变化的影响。

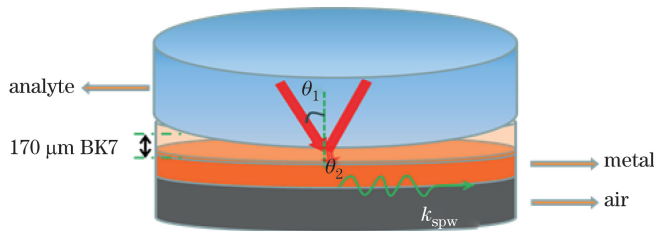


图 4 多层膜结构的液体棱镜

Fig. 4 Liquid prism with multi-layers structure

基于 SPR 原理,搭建一套测量液体介质折射率的传感系统,该系统由激光器、步进电机、探测器以及计算机采集装置组成,结构如图 5 所示<sup>[31]</sup>。经过小孔准直的激光束通过格兰棱镜变为  $P$  偏振光,入射到分束镜上,一束光作为监测,另一束光通过透镜聚焦到 V 型槽内的液体棱镜多层膜结构上。通过探测器和计算机记录反射光强,绘制角度扫描的 SPR 共振曲线。

为了更好地研究激光诱导的去离子水的热光性质,一般选取波长较短的入射光与焦距较短的透镜。然而,根据表面等离子体共振曲线,当入射光波为短波长时,其共振曲线相对较宽。随着波长的增大,SPR 共振曲线逐渐变得窄而细,共振角的变化更为灵敏。因此,在采用 SPR 共振的方法研究去离子水的热致折射

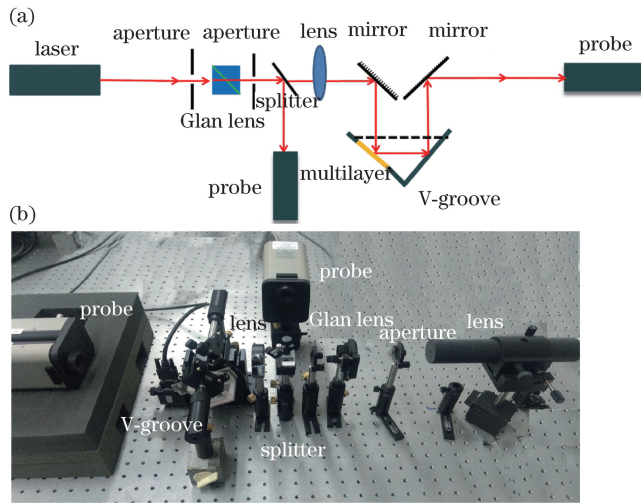


图 5 (a)实验原理图;(b)实验装置图

Fig. 5 (a) Experimental schematic; (b) experimental configuration

率变化时,为了使效果更为明显,选择功率可调的 980 nm 的连续光通过 75 mm 的聚焦透镜入射到液体介质与薄膜交界面处,通过改变入射光的功率激发 SPR 共振波,从理论上和实验上分析去离子水中由不同激光功率引起的稳态折射率变化。

图 6 理论模拟了 980 nm 的不同激光功率的光波对去离子水的 SPR 共振曲线的影响。在外界环境温度为 293 K 条件下,入射光功率为  $1 \times 10^{-4}$  W 的 980 nm 的光波入射,取水的折射率为 1.322, BK7 玻璃的折射率取 1.508,将此时激发的 SPR 共振角( $49.908^\circ$ )作为产生热致效应前的基准曲线。当入射光的功率从  $1 \times 10^{-4}$  W 增大到  $1 \times 10^{-2}$  W 时,共振角从  $49.908^\circ$  变化到  $49.909^\circ$ ,共振角的变化为  $0.001^\circ$ ,折射率变化  $1.94 \times 10^{-5}$ ;如果继续将入射光的功率增加 0.7 W(从 0.15 W 到 0.85 W),共振角从  $49.908^\circ$  变化到  $50.012^\circ$ ,角度移动为  $0.104^\circ$ ,折射率变化为  $1.4 \times 10^{-3}$ 。由于去离子水的热光系数为负值,当去离子水吸收激光能量,温度升高,折射率变化值为负值,使得水的折射率减小,相应的共振角向大角度方向移动。

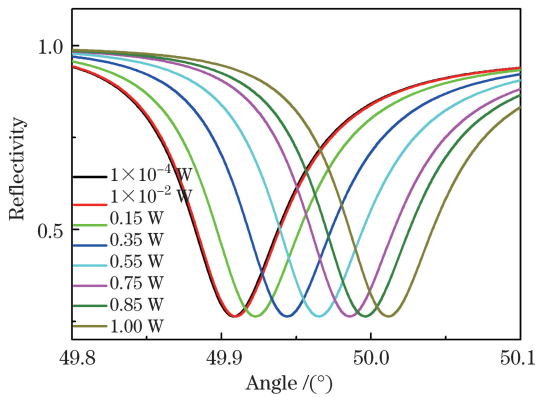


图 6 理论模拟去离子水随入射光功率  $P$  变化的 SPR 共振曲线

Fig. 6 Theoretical simulation on SPR curves of deionized water vary with various input power levels

### 3 实验结果分析

在很小的功率下,折射率的变化微小,热光效应并不明显,热致折射率所引起的角度变化并不明显。因此,将去离子水在小功率下的共振曲线作为基准,测量了待测液体介质的折射率以及液体介质的热致折射率变化。

室温下(293 K),实验测量的去离子水随入射光功率  $P$  变化的 SPR 共振曲线,如图 7(a)所示。实验中,将功率为  $1.56 \times 10^{-3}$  W 的 980 nm 的连续光入射条件下水的折射率作为参考曲线,共振角  $50.026^\circ$  作为基准

角度,水在室温下的折射率 1.322 作为基准折射率,假设此时稳态热效应未发生。增大入射光的功率使其从 0.15 W 变化到 0.85 W,此时通过小角度理论拟合实验曲线,共振角从  $50.026^\circ$  变化到  $50.163^\circ$ ,角度相对于基准角变化了  $0.137^\circ$ ,通过计算,折射率从 1.322 变化到 1.31865,折射率变化为  $3.35 \times 10^{-3}$ 。将实验数据与理论值进行比较,如图 7(b)为实验测量的去离子水折射率和功率之间的关系以及理论模拟的折射率随功率变化。图中的点表示在不同功率下的折射率值,红实线表示实验测量得到的折射率和功率拟合曲线,绿实线表示理论模拟去离子水功率与折射率关系曲线。从图中可以看出,在低功率下折射率随功率的变化与理论值拟合得比较好,功率增大,实验值比理论值变化明显。通过线性拟合可以得到去离子水的折射率和功率之间的关系,即  $n=1.32228-0.0042P$ ,理论模拟结果为  $n=1.322-0.002P$ ,其中  $P$  表示入射光的功率。通过比较理论模拟与实验测量拟合的线性关系式,发现这两者之间的斜率变化有一定的误差,这就导致功率越大,实验折射率比理论值要大。实验与理论之间差生误差的原因主要有:1)同一功率连续进行实验测量,照射时间比较长,导致在高功率下热积累效应逐渐增强,共振角向大角度方向偏移;2)实验中转台的连续转动和自动归位角度有一定的误差,导致角度测量有误差。

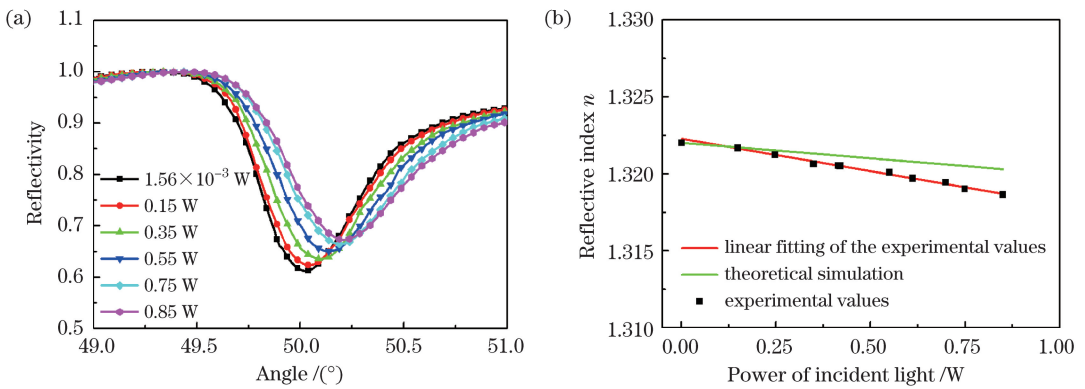


图 7 (a)实验测量去离子水随入射光功率  $P$  变化的 SPR 共振曲线;(b)去离子水实验测量和理论拟合的折射率与功率之间的关系

Fig. 7 (a) Experimental SPR curves of deionized water vary with various input power levels; (b) both experimental and theoretical fitting of refractive index of deionized water as a function of incident light power

## 4 结 论

从声光方程出发分析了热致折射率产生的物理机制,得出稳态热效应比瞬态热效应更明显。在稳态条件下对去离子水热致折射率进行仿真模拟,得出透镜焦距和波长越短,热致折射率变化越大。根据菲涅耳反射和折射定律,对不同功率下去离子水的稳态表面等离子体共振曲线进行了研究,从理论上得到了其折射率与激光功率之间的关系为  $n=1.322-0.002P$ 。利用新型的 SPR 共振检测技术,选择功率可调谐的 980 nm 的连续激光器和 75 mm 的聚焦透镜对去离子水产生的热效应进行了实验研究,得出去离子水折射率和入射光功率之间的关系为  $n=1.32228-0.0042P$ ,可以看出随入射光功率增大,产生的稳态热致折射率变化也相应地变大。最后简要分析了实验与理论之间的误差来源。该理论基础和实验内容对研究声光热致传播有一定的借鉴意义。

## 参 考 文 献

- Fukuhara M, Ota M, Sakai H, *et al.*. Low-loss waveguiding and detecting structure for surface plasmon polaritons[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(8): 081111.
- Shi Weihua, Wu Jing. Photonic crystal fiber sensor based on surface plasmonic and directional resonance coupling[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0206002.  
施伟华, 吴 静. 基于表面等离子体共振和定向耦合的光子晶体光纤传感器[J]. 光学学报, 2015, 36(10): 0206002.
- Espinosa-Sánchez Y M, Luna-Moreno D, Monzón-Hernández D. Detection of aromatic compounds in tequila through the use of surface plasmon resonance[J]. Applied Optics, 2015, 54(14): 4439-4446.

- 4 Wu D Y, Zhang M, Zhao L B, *et al.*. Surface plasmon-enhanced photochemical reactions on noble metal nanostructures [J]. *Science China Chemistry*, 2015, 58(4): 574-585.
- 5 Homola J, Yee S S, Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: Review [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 1999, 54(1-2): 3-15.
- 6 Homola J. Present and future of surface plasmon resonance biosensors [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2003, 377(3): 528-539.
- 7 Zhao Yang, He Jianfang, Yang Rongcao, *et al.*. Two-dimensional surface plasmonic grating optical absorber with gradually varying structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0223005.  
赵 阳, 何建芳, 杨荣草, 等. 结构渐变的二维表面等离子体光栅光吸收器 [J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0223005.
- 8 Zhang C L, Wang R, Min C J, *et al.*. Experimental approach to the microscopic phase-sensitive surface plasmon resonance biosensor [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(1): 011114.
- 9 Chen Qianghua, Liu Jinghai, Luo Huifu, *et al.*. Refractive index measurement syetem of liquid based on surface plasmon resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0512002.  
陈强华, 刘景海, 罗会甫, 等. 一种基于表面等离子体共振的液体折射率测量系统 [J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0512002.
- 10 Chen Qianghua, Luo Huifu, Wang Sumei, *et al.*. Gas refractive index measurement system based on a surface plasmon resonance sensor with self-adaptive structure for angle shift and phase detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1212003.  
陈强华, 罗会甫, 王素梅, 等. 基于相位测量的角漂移自适应结构表面等离子体共振气体折射率测量系统 [J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1212003.
- 11 Zhang Bingxin, Chen Shufen, Fu Lei, *et al.*. A temperature-controlled tunable plasmonic dual-band absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0723005.  
张兵心, 陈淑芬, 付 雷, 等. 一种温控的可调表面等离子体光学器件 [J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0723005.
- 12 Sundari S T, Srinivasu K, Dash S, *et al.*. Temperature evolution of optical constants and their tuning in silver [J]. *Solid State Communications*, 2013, 167: 36-39.
- 13 Yeshchenko O A, Bondarchuk I S, Gurin V S, *et al.*. Temperature dependence of the surface plasmon resonance in gold nanoparticles [J]. *Surface Science*, 2013, 608: 275-281.
- 14 Yeshchenko O A, Dmitruk I M, Alexeenko A A, *et al.*. Size and temperature effects on the surface plasmon resonance in silver nanoparticles [J]. *Plasmonics*, 2012, 7(4): 685-694.
- 15 Chu Y C, Chen K H, Lin J Y, *et al.*. Measurement of two-dimensional distribution of temperature with surface plasmon resonance [C]. *SPIE*, 2013, 8769: 87692T.
- 16 Wu Y C, Gu Z T. Research on the thermo-characteristics of surface plasmon resonance spectrum [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(8): 081301.
- 17 Venugopal N, Mitra A. Influence of temperature dependent morphology on localized surface plasmon resonance in ultra-thin silver island films [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 285: 357-372.
- 18 Chu Y C, Chen K H, Lin J Y, *et al.*. Measurement of full-field temperature distributions by using surface plasmon resonance and common-path phase-shifting interferometry [J]. *Measurement*, 2014, 48: 162-166.
- 19 Gentleman D J, Obando L A, Masson J-F, *et al.*. Calibration of fiber optic based surface plasmon resonance sensors in aqueous systems [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 515(2): 291-302.
- 20 Brantzen S, Volklein F, Knoll W, *et al.*. A New sensor for the thermo-optical detection of surface plasmon resonance [J]. *Sensors and Actuators a-Physical*, 2007, 135(2): 492-501.
- 21 Tran V T, Zhou H, Hong S, *et al.*. Thermal behavior of surface plasmon resonance in dynamic suprastructure multilayer [J]. *Current Applied Physics*, 2013, 13(5): 940-944.
- 22 Xiao X J, Gao Y, Xiang J A, *et al.*. Laser-induced thermal effect in surface plasmon resonance [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 676(1-2): 75-80.
- 23 Davis L J, Deutsch M. Surface plasmon based thermo-optic and temperature sensor for microfluidic thermometry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(11): 11490.
- 24 Kaya S, Weeber J C, Zacharatos F, *et al.*. Photo-thermal modulation of surface plasmon polariton propagation at

- telecommunication wavelengths[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22269-22284.
- 25 M Yamane, Y Asahara. *Glasses for photonics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- 26 F T S Yu, S Yin. *Photorefractive optics: Materials, properties, and applications*[M]. New York: Academic Press, 1999.
- 27 J P Gordon, R C C Leite, R S Moore, *et al.*. Long-transient effects in lasers with inserted samples[J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, 36(1): 3-8.
- 28 Yang J Y, Song Y L. Direct observation of the transient thermal-lensing effect using the phase-object *Z*-scan technique[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(2): 157-159.
- 29 Yang J Y, Song Y L, Gu J H, *et al.*. Determinations of the transient thermal lensing effect in metal cluster polymer  $\{WS_4Cu_4I_2(bpe)_3\}_n$  solution by the use of the *Z*-scan[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(1): 122-125.
- 30 Lan G Q, Liu S G, Zhang X R, *et al.*. A simplified high figure-of-merit prism-free surface plasmon resonance refractive index sensor based on self adaptive angular interrogation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(2): 025006.
- 31 Lan G Q, Liu S G, Ma Y, *et al.*. Sensitivity and figure-of-merit enhancements of liquid-prism SPR sensor in the angular interrogation[J]. *Optics Communications*, 2015, 352(2): 49-54.