

亚波长单金属槽电磁场增强分析

张斯文 刘海涛 母国光

(南开大学信息技术科学学院现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 针对金属微纳结构在表面增强拉曼光谱领域的应用,研究了金属基底亚波长单槽结构产生的电磁场增强。采用全矢量方法严格计算了平面波照明下金属槽外部区域电磁场的分布情况。建立了法布里-珀罗(F-P)半解析模型,该模型能够精确预言全矢量方法的计算结果,能够节省设计最优槽深的计算量。基于该模型分析了金属槽外部区域电场增强的物理机制,结果表明达到相长叠加共振状态的金属槽内基模在槽外空间中激励的透射电场是金属槽外空间中电场增强的主要来源。研究了槽外空间电场增强的范围,结果表明对于不同的槽宽和入射波长,在垂直距离槽口0.1倍波长的范围内电场增强较为明显,在该范围之外,电场增强因子迅速衰减到1的数量级。

关键词 光谱学;表面增强拉曼光谱;电磁场增强;亚波长单金属槽;全矢量数值方法;法布里-珀罗模型

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0310002

Electromagnetic Enhancement by a Single Subwavelength Groove in Metallic Substrate

Zhang Siwen Liu Haitao Mu Guoguang

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, College of Information Technical Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract The electromagnetic enhancement generated by a single subwavelength groove in metallic substrate is analyzed for the application of surface enhanced Raman scattering (SERS) on metallic micronano-structure. The electromagnetic field distribution out of the groove illuminated by a plane-wave is calculated using fully-vectorial numerical method. The rigorous fully-vectorial data are well predicted by a simple semi-analytical Fabry-Perot (F-P) model. The computation amount for designing the optimal groove depth can be saved by using the model. Physical mechanism of electric-field enhancement out of the groove, based on the model is analysed, which shows that the enhancement is mainly attributed to the transmitted field of enhanced fundamental groove mode under resonance. The range of the enhanced electric-field out of the groove is studied. The results show that, for different groove widths and illumination wavelengths, the electric-field enhancement is considerable at vertical distances to the groove mouth less than 0.1 times of the wavelength and that out of this range, the electric-field enhancement factor attenuates rapidly to about unitary magnitude.

Key words spectroscopy; surface enhanced Raman scattering; electromagnetic enhancement; subwavelength metallic single groove; fully-vectorial numerical method; Fabry-Perot model

OCIS codes 240.6695; 050.6624; 260.2110; 260.3910

1 引言

传统的拉曼光谱分子检测方法^[1,2]中,由于分子的拉曼散射截面很小,拉曼散射光信号很弱,导致探测的灵敏度低,耗费样品的数量大,并且系统体积

大,不容易微型化和集成化。表面增强拉曼散射(SERS)^[3]的发现,克服了传统拉曼光谱传感的不足。当贵金属(如金、银、铜)表面具有一定形式的亚波长尺度微结构时,微结构附近的局部电场有可能

收稿日期:2010-07-19;收到修改稿日期:2010-11-01

基金项目:国家自然科学基金(10804057)、国家973计划(2007CB307001)、教育部高等学校科技创新工程重大项目培育资金(708021)和教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-08-0289)资助课题。

作者简介:张斯文(1984—),女,博士研究生,主要从事微纳米光学的研究。E-mail:cheung.season@gmail.com

导师简介:刘海涛(1978—),男,博士,教授,主要从事微纳米光学及衍射光学的研究。

E-mail:liuht@nankai.edu.cn(通信联系人)

获得极大的增强,从而使得该区域内被测分子的拉曼信号出现极大的增强,即产生 SERS。SERS 大大提高了拉曼光谱分子传感的灵敏度,甚至能够达到单分子探测的水平^[4],同时具有微纳米尺度的 SERS 传感系统很容易微型化和集成化,这使得 SERS 在生物、化学分子高灵敏度探测领域有广泛的应用前景,吸引了广大研究者的注意^[5-8]。采用化学合成的方法^[9,10],能够制作出实现 SERS 的无序金属结构^[11,12],虽然制作成本较低,但是不利于对 SERS 机理的研究,从而不利于指导设计获得高的拉曼散射光增强因子。随着现代微纳米加工技术的不断进步,如能达到纳米量级分辨率的电子束曝光、离子束刻蚀等工艺,则可以加工出实现 SERS 的有序金属结构。此类结构可以提供更系统、可重复的研究数据,有利于 SERS 机理的深入研究,从而获得高的拉曼信号增强因子。已有的研究表明,贵金属基底上加工的亚波长槽结构能够实现极高的电场增强^[13,14],同时金属槽结构简单,容易制作。针对单金属槽内部区域的电场增强,本文作者^[15]已经系统研究了结构参数、照明条件等对增强因子的影响,并分析了相应的物理机制。在 SERS 的实际应用中,待测样品分子具有一定的尺寸,并且位于电场较强的金属槽口附近,因此对单金属槽外部空间电场增强及相关机制的研究有重要意义,目前还有待深入研究。

本文针对上述问题,采用严格求解麦克斯韦方程组的全矢量方法^[16]计算了亚波长单金属槽结构内部、外部区域电磁场的分布,引入法布里-珀罗(F-P)模型复现了严格计算结果,进而基于该模型分析了槽外部空间中电场增强的物理机制。采用全矢量方法研究了电场增强因子沿垂直于槽口方向在空间中的衰减情况,明确了单槽外部空间中电场增强的范围。

2 方 法

图 1(a)给出了金属基底单槽结构及选取坐标系的示意图。取坐标原点位于金属槽口中心,系统沿 y 轴方向不变。单槽宽度为 w , z 向深度为 h 。金属基底折射率为 n_m (计算中取基底材料为金,不同波长对应的金的折射率取自文献^[17]),介质折射率为 n_a (计算中取介质为空气, $n_a = 1$)。取 TM 偏振(磁场分量平行于 y 轴)的均匀平面波入射金属槽,设波长为 λ 。已有的研究^[15]表明,选取不同入射角的平面波照明单槽结构时,入射角对电磁场增强的影响很

小,因此本文的计算均针对平面波正入射结构的情况(即波矢垂直于基底表面)。

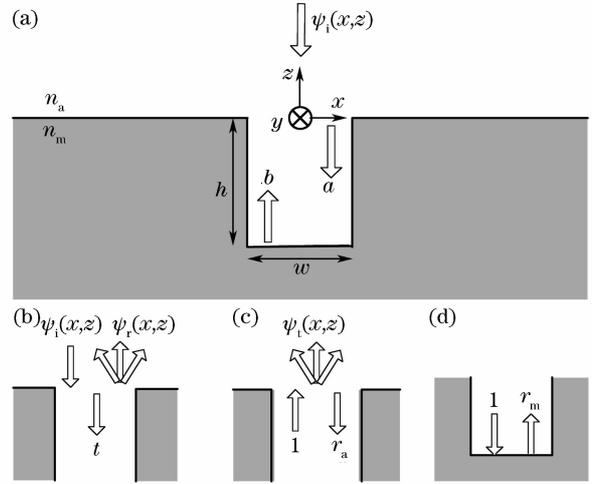


图 1 (a) 金属基底单槽结构及坐标系; (b)~(d) F-P 模型中基本散射系数的定义

Fig. 1 (a) A single groove cut in metallic substrate and the coordinate system; (b) ~ (d) definition of elementary scattering coefficients in F-P model

电磁场增强的数据可以采用严格求解麦克斯韦方程组的全矢量方法获得,这里采用非周期傅里叶模式法(a-FMM)^[16],该方法是严格耦合波分析方法(RCWA)向非周期结构的推广。RCWA 是一种发展较为成熟的电磁场严格计算方法,目前广泛应用于光栅等周期结构的电磁场分析,a-FMM 通过引入完美匹配吸收边界层,将非周期结构转化为周期结构,进而采用 RCWA 求解电磁场分布。

为了分析电磁场增强的物理机制,采用 F-P 半解析模型。目前已经建立了能够复现金属槽内部区域电磁场分布的 F-P 模型^[15],将此模型加以推广,使之能够复现金属槽外部区域的电磁场分布,用以分析槽外部区域电场增强的物理机制。当金属槽宽度小于约 $0.5\lambda/n_a$ 时,根据波导理论^[18],金属槽中只有 TEM_{00} 模式是传播模式,在这里称为基模,其他高阶模式均为衰减模式,于是 F-P 模型中只保留基模而忽略其他高阶模式,将槽内 ($-h \leq z \leq 0$) 电磁场表达为^[15]

$$\psi_m(x, z) = a\psi_0^-(x)\exp(-ik_0 n_{\text{eff}} z) + b\psi_0^+(x)\exp[ik_0 n_{\text{eff}}(h + z)], \quad (1)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda$, $\psi = [H_y, E_x, E_z]$ 表示 TM 偏振下电磁场的 3 个分量。 $\psi_0^+(x)$, $\psi_0^-(x)$ 分别表示槽内沿 z 轴正、负方向传播基模的横向场分布, n_{eff} 为基模的等效折射率。由于基模为传播模式,因此 n_{eff} 的虚部(代表基模衰减)为很小的数值。基模的归一化满足槽

中心处($x = 0$)磁场为1,即 $H_{y,0}^+(0) = H_{y,0}^-(0) = 1$ 。入射平面波 $\psi_i(x, z)$ 的归一化满足槽口中心处($x = z = 0$)磁场为1,即 $H_{y,i}(0, 0) = 1$ 。如图1(a)所示,(1)式中 a, b 分别表示槽中沿 z 轴负、正方向传播的基模的未知系数,满足模式耦合方程^[15]

$$\begin{cases} a = t + r_a \exp(ik_0 n_{\text{eff}} h) b \\ b = r_m \exp(ik_0 n_{\text{eff}} h) a \end{cases} \quad (2)$$

将图1(a)中金属槽视为两个无限深狭缝的组合,其中一个狭缝的顶端面取为金属槽顶端面,如图1(b),(c)所示,另一个狭缝的底端面取为金属槽底端面,如图1(d)所示。定义 t 为入射平面波激励狭缝基模(即金属槽基模)的透射系数, r_a 为狭缝基模在顶端面的反射系数, r_m 为狭缝基模在底端面的反射系数。(1)式中 $\psi_0^+(x)$, n_{eff} 可采用 a-FMM^[11] 计算得到,(2)式中 t, r_a, r_m 等散射系数可采用散射矩阵算法^[16,19] 得到。(2)式构成 a, b 的一组线性方程组,求解可得

$$\begin{cases} a = \frac{t}{1 - r_a r_m \exp(2ik_0 n_{\text{eff}} h)} \\ b = \frac{r_m \exp(ik_0 n_{\text{eff}} h)}{1 - r_a r_m \exp(2ik_0 n_{\text{eff}} h)} \end{cases} \quad (3)$$

于是槽外部自由空间中($z > 0$)的电磁场可以表达为

$$\psi_{\text{out}}(x, z) = \psi_i(x, z) + \psi_r(x, z) + b \exp(ik_0 n_{\text{eff}} h) \psi_t(x, z), \quad (4)$$

式中 $\psi_i(x, z)$ 为已知的入射平面波, $\psi_r(x, z)$ 为平面波入射无限深狭缝时在空气中激励的反射场,可以采用 a-FMM 求解图1(b)所示的散射问题得到。

$\psi_t(x, z)$ 为无限深狭缝中单位系数基模入射狭缝顶端面时在空气中激励的透射场,可以采用 a-FMM 求解图1(c)所示的散射问题得到。(4)式表明,采用 F-P 模型可以分别计算反射场 $\psi_r(x, z)$ 以及基模透射场 $b \exp(ik_0 n_{\text{eff}} h) \psi_t(x, z)$, 进而用于分析槽外空间中电磁场增强的来源与机理,这是全矢量方法(如 a-FMM)无法实现的。

已有的研究表明,拉曼散射光的增强倍数近似正比于被测分子位置总场电场分量的4次方(即强度的平方)^[20],其中总场包括入射场与散射场两部分贡献。因此只考虑电场的增强,定义电场增强因子(或电场归一化强度)为 $E_F(x, z) = |E(x, z)|^2 / |E_i|^2$, 其中 $|E_i|^2$ 为正入射平面波电场分量的强度, $|E(x, z)|^2 = |E_x(x, z)|^2 + |E_z(x, z)|^2$ 为空间(x, z)处总场的电场分量强度。于是拉曼信号的电磁增强因子可以近似表示为^[20] $E_{F,\text{SERS}} = E_F^2$ 。

3 结果与分析

3.1 验证 F-P 模型

图2给出了 TM 偏振均匀平面波正入射金基底单槽时,槽外部空间中电磁场3个分量的强度分布,均用入射波的强度做了归一化,分别采用 a-FMM 及 F-P 模型计算。入射波长 $\lambda = 1 \mu\text{m}$, 该波长对应的金折射率 $n_m = 0.26 + 6.82i$, 槽宽 $w = 0.1\lambda$, 槽深 h 满足 F-P 共振条件^[15]

$$2k_0 \text{Re}(n_{\text{eff}})h + \arg(r_a) + \arg(r_m) = 2m\pi, \quad (5)$$

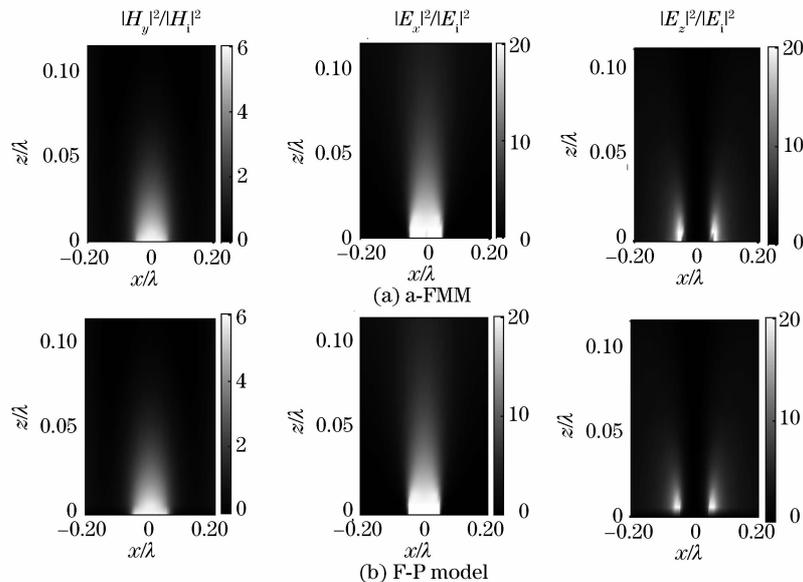


图2 验证(a)非周期傅里叶模式和(b)F-P模型计算槽外部空间电磁场的有效性

Fig. 2 Verify the validity of (a) a-FMM and (b) F-P model in calculating the electromagnetic field out of the groove

式中 m 为满足 $h > 0$ 的整数, 计算中取 $m = 0$, 得到 $h = 0.124\lambda$ 。图 2 从左到右依次显示 $|H_y|^2/|H_i|^2$, $|E_x|^2/|E_i|^2$, $|E_z|^2/|E_i|^2$, 其中 $|E_i|^2$, $|H_i|^2$ 分别为入射平面波电场、磁场分量的强度。比较全矢量方法与模型预言的结果, 发现两种方法得到的槽外部区域电磁场分布吻合得很好, 验证了模型计算槽外部空间中电磁场的有效性。波长、槽宽、槽深取不同数值的计算结果以及第 2 节中模型的建立过程表明, F-P 模型适用于金属槽中除基模外的高阶模式均为衰减模式的情形, 这要求金属槽宽度小于约 $0.5\lambda/n_a$ 。文献[15]的结果表明, 高的电场增强因子要求小的槽宽, 此时 F-P 模型的适用条件能够满足。

不同波长、槽宽的计算结果表明, 当其他参数(波长、槽宽、...) 固定时, 共振条件(5)式确定的槽深 h 对应槽外部最高的电场增强因子, 从而节省了设计最优槽深的计算量。图 2 所示的槽深满足共振条件时的电磁场分布具有代表性, 对于其他槽宽和波长数值的计算结果表明, 当槽深度满足共振条件时, 磁场在槽底位置强度最大, 电场在槽口处强度达到

最大, 距离槽口越远则电场分量的强度越低。在 SERS 的应用中, 样品分子放置于金属槽口附近, 电场分量的强度在槽口处达到最大, 有利于增强样品拉曼散射光的强度。

3.2 槽外空间电场增强的物理机制

为了分析槽深满足共振条件(5)式时槽外空间电场增强的物理机制, 采用 F-P 模型[(4)式]分别计算了入射平面波及其反射场 $\psi_i(x, z) + \psi_r(x, z)$, 基模透射场 $b\exp(ik_0 n_{\text{eff}} h)\psi_i(x, z)$ 以及槽外空间总场 $\psi_{\text{out}}(x, z)$ 的分布, 进而分析前两者对总场各自的贡献。图 3 给出了平面波正入射金基底单槽时, 模型得到的槽外空间($z > 0$) 中电场分量的强度分布(用入射平面波电场分量 E_i 的强度做了归一化), 槽宽分别取 $w = 0.01\lambda$ (槽深 $h = 0.075\lambda$) 和 $w = 0.05\lambda$ (槽深 $h = 0.120\lambda$), 槽深 h 满足共振条件(5)式, 入射波长 $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 。图 3 左、中、右列分别给出了 $\psi_i(x, z) + \psi_r(x, z)$, $b\exp(ik_0 n_{\text{eff}} h)\psi_i(x, z)$ 以及 $\psi_{\text{out}}(x, z)$ 的电场分量 E 的归一化强度分布, 其中强度分布及 z 坐标均采用对数坐标。

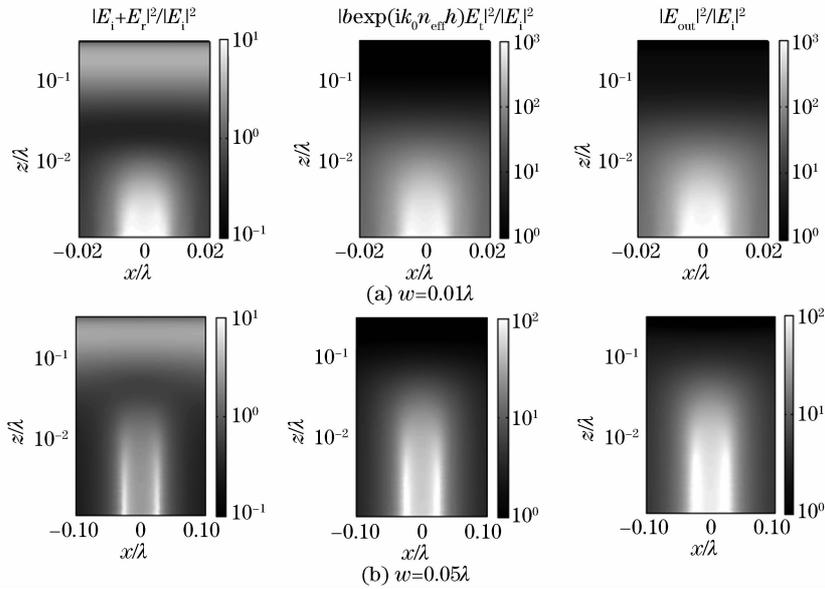


图 3 槽外部空间中电场增强的机制分析

Fig. 3 Analysis of the mechanism of the electric-field enhancement out of the groove

图 3 的结果以及其他波长、槽宽的结果表明, 当槽深满足共振条件(5)式时

$$|E_i(x, z) + E_r(x, z)|^2 \ll$$

$$|b\exp(ik_0 n_{\text{eff}} h)E_i(x, z)|^2 \approx |E_{\text{out}}(x, z)|^2 \quad (6)$$

成立, 即槽外区域获得增强的电场分量强度 $|E_{\text{out}}(x, z)|^2$ 主要来自发生共振的基模透射场 $|b\exp(ik_0 n_{\text{eff}} h)E_i(x, z)|^2$, 与之相比, 入射平面波及其反射场的贡献 $|E_i(x, z) + E_r(x, z)|^2$ 很小。分

析(3)式可知, 当槽深满足共振条件(5)式时, 基模系数 b 将达到很大的数值, 这在物理上意味着基模在槽上下两个端面的多次反射实现了相长叠加, 即达到了共振状态, 使得基模场获得增强, 进而使得基模透射场获得增强。从图 3 所示的数值上看, $|E_i(x, z) + E_r(x, z)|^2/|E_i(x, z)|^2$ 在 $0.1 \sim 10$ 之间, 并且其最大数值对槽宽的变化不敏感。而槽深满足共振条件时, 对于不同的槽宽($w = 0.05\lambda \sim$

0.01λ), $|\text{bexp}(ik_0 n_{\text{eff}} h) E_i(x, z)|^2 / |E_i(x, z)|^2$ 可以达到 $10^2 \sim 10^3$, 构成了对总场的主要贡献, 其最大数值对槽宽的变化非常敏感。

3.3 槽外空间电场增强的范围

在 SERS 的应用中, 放置于金属槽口附近的样品分子具有一定的尺寸, 因此研究槽外空间电场增强因子的衰减情况及增强范围有重要的实际意义。图 4 给出了对于不同的槽宽, 采用 a-FMM 计算得到的 $x = 0$ 处电场增强因子 $E_F(0, z) = |E(0, z)|^2 / |E_i|^2$ 随着垂直距离 z 的增大而逐渐衰减的情况。计算选取波长 $\lambda = 1 \mu\text{m}$, 图 4 中实线、虚线、点线、点划线分别对应 $w = 0.005\lambda$ ($h = 0.055\lambda$), $w = 0.01\lambda$ ($h = 0.075\lambda$), $w = 0.05\lambda$ ($h = 0.120\lambda$), $w = 0.1\lambda$ ($h = 0.124\lambda$), 槽深满足共振条件(5)式。

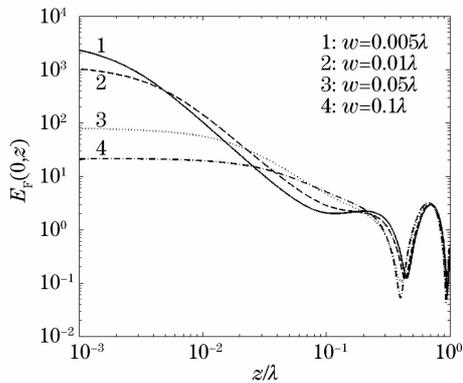


图 4 不同槽宽对应的电场增强因子 $E_F(0, z)$ 随垂直距离 z 的增大而逐渐衰减的情况

Fig. 4 Attenuation of $E_F(0, z)$ as the vertical distance z increases, which are calculated using a-FMM for different groove widths

图 4 表明, 槽宽 w 越小, 则槽口处电场增强因子 E_F 越大^[10], 例如当 $w = 0.005\lambda$ 时, 槽口处 E_F 达到 2×10^3 , 对应的 SERS 增强因子为 4×10^6 。随着槽外场点垂直距离 z 的增大, E_F 迅速衰减, 并且槽越窄, 对应的 E_F 衰减越快。值得注意的是, 当 z 增大到约 0.1λ 时, 对于不同的槽宽数值, E_F 均统一衰减到 1 的数量级, 并且随着 z 的进一步增大, 不同槽宽对应的 E_F 数值非常接近。另外选取波长 $\lambda = 0.7, 3, 10 \mu\text{m}$ 进行了相同的计算, 结果表明图 4 中的数值结果对其他波长也近似成立。由此得出结论, 对于不同的波长和槽宽, 当槽深满足共振条件时, 槽外空间电场增强的垂直范围大致为 $z < 0.1\lambda$ 。

4 结 论

针对表面增强拉曼光谱的应用, 研究了金基底亚波长单槽结构电场增强的情况。采用全矢量方法 a-FMM 严格计算了金属槽外部空间中电磁场的分布, 建立了 F-P 半解析模型, 能够精确预言严格计算的结果, 并且模型给出的共振条件确定的槽深对应槽外部最高的电场增强因子, 节省了设计最优槽深的计算量。基于该模型分别计算了入射平面波及其反射场、共振条件下槽基模透射场二者对槽外空间总场的贡献, 结果表明后者构成了槽外部空间电场增强的主要来源, 而前者的贡献很小可以忽略, 这是全矢量严格计算方法无法实现的, 体现了模型的优势。另外, 采用 a-FMM 严格计算了电场增强因子随着到槽口的垂直距离 z 增大而逐渐衰减的情况。结果表明, 对于不同的波长和槽宽, 当槽深满足共振条件时, 槽外空间电场增强的范围大致为 $z < 0.1\lambda$ 。当 z 超出这个范围时, 电场增强因子统一衰减到 1 的数量级, 电场增强现象不再显著。本文的数值结果和理论分析将为设计实现表面增强拉曼光谱的亚波长金属槽结构提供理论指导, 以获得高的拉曼信号增强因子。对于实际中采用的金属槽阵列结构^[8], 期望本文基于 F-P 模型的分析也是适用的, 此时金属槽阵列中各槽之间的电磁相互作用也需要加以考虑^[21]。

参 考 文 献

- Lin Juqiang, Huang Ruixiang, Li Yongzeng *et al.*. Raman spectroscopy for chick embryo vascular injury with anti-angiogenesis drugs [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10):2647~2650
林居强, 黄瑞香, 李永增 等. 抗血管生成药物对鸡胚血管作用的拉曼光谱[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10):2647~2650
- Chen Xiuli, Wang Guiwen, Yin Xiaolin *et al.*. Single-cell Raman spectral analysis of oxygenated and deoxygenated thalassemia erythrocytes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10):2854~2859
陈秀丽, 王桂文, 尹晓林 等. 单细胞拉曼光谱分析地中海贫血红细胞的氧合态和去氧态[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10):2854~2859
- P. L. Stiles, J. A. Dieringer, N. C. Shah *et al.*. Surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. *Annu. Rev. Anal. Chem.*, 2008, **1**:601~626
- S. Nie, S. R. Emory. Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering [J]. *Science*, 1997, **275**(5303):1102~1106
- M. B. Wabuyele, T. Vo-Dinh. Detection of human immunodeficiency virus type 1 DNA sequence using plasmonics nanoprobe [J]. *Anal. Chem.*, 2005, **77**(23):7810~7815
- Feng Shangyuan, Chen Rong, Li Yongzeng *et al.*. Surface-enhanced Raman spectroscopy of Dangshen decoction [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1):121~124
冯尚源, 陈荣, 李永增 等. 党参煎剂表面增强拉曼光谱[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1):121~124

- 7 W. Yuan, Hu Pui Ho, R. K. Y. Lee *et al.*. Surface-enhanced Raman scattering biosensor for DNA detection on nanoparticle island substrates [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(22):4329~4337
- 8 Han Hongwen, Yan Xunling, Ban Ge *et al.*. Surface-enhanced Raman spectra analysis of serum from diabetes mellitus and complication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4):1122~1125
韩洪文,闫循领,班戈等. 糖尿病及并发症血清的表面增强拉曼光谱[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4):1122~1125
- 9 M. Culha, D. Stokes, L. R. Allain *et al.*. Surface-enhanced Raman scattering substrate based on a self assembled monolayer for use in gene diagnostics [J]. *Anal. Chem.*, 2003, **75**(22):6196~6201
- 10 Liu Renming, Zi Xingfa, Wu Yanchun *et al.*. Studies and preparation of surface enhanced Raman scattering substrate of two-dimensional silver nanofilms [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10):2657~2661
刘仁明,自兴发,武延春等. 二维纳米结构银膜表面增强拉曼散射基底的制备与研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10):2657~2661
- 11 H. Tamaru, H. T. Miyazaki, K. Miyano. Resonant light scattering from individual Ag nanoparticles and particle pairs [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(10):1826~1828
- 12 H. Xu, J. Aizpurua, M. Käll *et al.*. Electromagnetic contributions to single-molecule sensitivity in surface-enhanced Raman scattering [J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **62**(3):4318~4324
- 13 J. L. Percec, P. Quémerais, A. Barbara *et al.*. Why metallic surfaces with grooves a few nanometers deep and wide may strongly absorb visible light [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(6):066408
- 14 H. T. Miyazaki, Y. Kurokawa. How can a resonant nanogap enhance optical fields by many orders of magnitude? [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(6):1565~1576
- 15 S. W. Zhang, H. T. Liu, G. G. Mu. Electromagnetic enhancement by a single nano-groove in metallic substrate [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, **27**(7):1555~1560
- 16 E. Silberstein, P. Lalanne, J. P. Hugonin *et al.*. Use of grating theories in integrated optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(11):2865~2875
- 17 E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids [M]. Orlando: Academic Press, 1985, Part II
- 18 Zhang Keqian, Li Dejie. Electromagnetic Theory in Microwaves and Optoelectronics [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 1994. 279~293
张克潜,李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京:电子工业出版社, 1994. 279~293
- 19 L. F. Li. Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(5):1024~1035
- 20 F. J. García-Vidal, J. B. Pendry. Collective theory for surface enhanced Raman scattering [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(6):1163~1166
- 21 H. T. Liu, P. Lalanne. Microscopic theory of the extraordinary optical transmission [J]. *Nature*, 2008, **452**(7188):728~731