

# 同步辐射红外谱学显微光束线站的空间分辨率测试

朱化春 佟亚军 吉 特 彭蔚蔚 张增艳 陈 敏\* 肖体乔

中国科学院上海应用物理研究所上海光源, 上海 201204

**摘要** 同步辐射红外光源具有宽光谱范围、高准直性、高亮度等特点。相比于传统的红外热光源,同步辐射红外光源的尺寸非常小,空间分辨率可达到衍射极限。为了得到准确的空间分辨率信息,对上海光源BL01B1红外谱学显微光束线站的空间分辨率进行了测试。使用刀片法和鉴别率板对上海光源BL01B1红外谱学显微光束线站水平和垂直方向的空间分辨率进行了详细测量,两种测试方法的结果都表明在所测的中红外波段,同步辐射红外谱学显微技术的空间分辨率达到衍射极限,与理论值十分符合。

**关键词** 光谱学;同步辐射红外;谱学显微;衍射极限;空间分辨率

**中图分类号** O434.3; O433.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0430002

## Spatial Resolution Measurement of Synchrotron Radiation Infrared Microspectroscopy Beamline

Zhu Huachun Tong Yajun Ji Te Peng Weiwei Zhang Zengyan Chen Min Xiao Tiquiao

Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China

**Abstract** Infrared synchrotron radiation provides considerable brightness advantages over conventional infrared sources in a wide wavelength range, allowing the spatial resolution to reach the diffraction limit. Spatial resolution of BL01B1 infrared microspectroscopy beamline station in Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) is tested. Step-edge method and resolution target bar method are used to measure the spatial resolution of the infrared microspectroscopy beamline BL01B1. The experimental results show that the spatial resolution of this infrared microspectroscopy beamline station and the diffraction limit theory are comparable in the middle infrared region.

**Key words** spectroscopy; infrared synchrotron radiation; microspectroscopy; diffraction limit; spatial resolution

**OCIS codes** 300.6340; 260.3060; 110.3080

### 1 引 言

同步辐射红外光源具有宽光谱范围,高准直性,高亮度等特点。同步辐射红外光源在整个红外波段的亮度是传统热光源(如 global 光源)亮度的2~3个数量级以上<sup>[1-3]</sup>。红外显微镜空间分辨率的提升是依靠限制光阑实现的,传统热光源的光源点尺寸很大,准直性差,使用其作为红外显微镜的光源时,由于其亮度低,在光阑开到衍射极限尺寸时,通量极低,无法获取高信噪比光谱<sup>[1]</sup>。而第三代同步辐射红外光源点的尺寸在亚毫米量级<sup>[1-2]</sup>,准直性好,使用其作为红外显微镜的光源时,红外显微镜的空间分辨率可以在无光阑限制的情况下聚焦到衍射极限,并且可以实现高通量,获得高信噪比光谱<sup>[1-5]</sup>,因此使用同步辐射红外光源红外显微镜能够实现微米级空间分辨,能够在微观领域获得传统光源难以采集到的光谱和图像,可以极大地提高实验数据采集的效率和质量。同步辐射红外显微谱学已经在生物医学<sup>[6-8]</sup>、化学<sup>[9-10]</sup>以及考古<sup>[11]</sup>等许多领域得到了广泛的应用。Holman等<sup>[6]</sup>利用同步辐射红外显微谱学技术研究活细胞,Benning等<sup>[10]</sup>利用该技术研究蓝藻硅

收稿日期: 2014-10-29; 收到修改稿日期: 2014-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(11475252)、国家自然科学基金青年基金(11405258)

作者简介: 朱化春(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事红外束线技术及红外谱学显微应用等方面的研究。

E-mail: zhuhuachun@sinap.ac.cn

\*通信联系人。E-mail: chenmin@sinap.ac.cn

化后的分子特性,Cotte等<sup>[11]</sup>则利用该技术进行了考古方面的研究。

如上所述,样品的微区谱学测量技术得到了非常广泛的应用,而空间分辨率是评价同步辐射红外谱学显微性能的重要指标之一。Martin等<sup>[12]</sup>报导了美国先进光源(ALS)的红外谱学显微线站的空间分辨率测试,结果显示其空间分辨率在红外波段达到了衍射极限,由于他们是在反射模式下测试的,因而只测试了一维方向的空间分辨率,未能给出二维方向的测试结果。国际上其他红外谱学显微光束线站对于空间分辨率的详细报道比较少。受限于同步辐射装置,同步辐射红外谱学显微术在国内尚处于起步阶段。上海光源已经建成了国内第一条基于第三代同步辐射红外光源的谱学显微线站<sup>[11]</sup>,为国内外用户提供了一个高性能的实验平台用于同步辐射红外谱学显微研究。为了准确得到上海光源红外谱学显微线站的红外波段的空间分辨率信息,本文采用刀口法<sup>[12-14]</sup>和鉴别率板法测试了上海光源BL01B1红外显微谱学光束线站中红外波段的空间分辨率,并给出了二维方向的详细测试结果。

## 2 实验原理

同步辐射红外谱学显微线站的红外显微镜样品处的聚焦光斑尺寸由同步辐射电子束团的几何光斑尺寸和光学系统的衍射极限所决定,其光斑尺寸 $R_s$ (半峰全宽FWHM)为

$$R_s = [(d_r \lambda)^2 + (m\sigma)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中 $d_r$ 为衍射受限因子, $\lambda$ 为波长, $m$ 为光束线站系统的缩放系数, $\sigma$ 为同步辐射电子束团的半峰全宽。

上海同步辐射光源同步电子束团水平和垂直方向的FWHM分别为180.95  $\mu\text{m}$ (水平)和37.60  $\mu\text{m}$ (垂直)。上海光源BL01B1红外光束线站使用中间开有2.6 mm宽缝隙的引出平面镜M1将同步辐射红外光引出并反射到平面镜M2上,M2将该光束反射到超环面镜T1上,并入射到化学气相沉淀金刚石(CVD)窗(隔离超高真空和高真空用),通过超环面反射镜T2将同步辐射红外光准直后入射到M3镜,最终入射到傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)及红外显微镜中<sup>[11]</sup>。整个光束线站系统的缩放比约为214:1,电子束团经红外显微镜聚焦后的几何光斑尺寸(FWHM)为0.18  $\mu\text{m}$ (垂直)和0.85  $\mu\text{m}$ (水平)。根据(1)式可知,理论上红外显微镜焦点处光斑的FWHM与波长的关系应如图2所示。

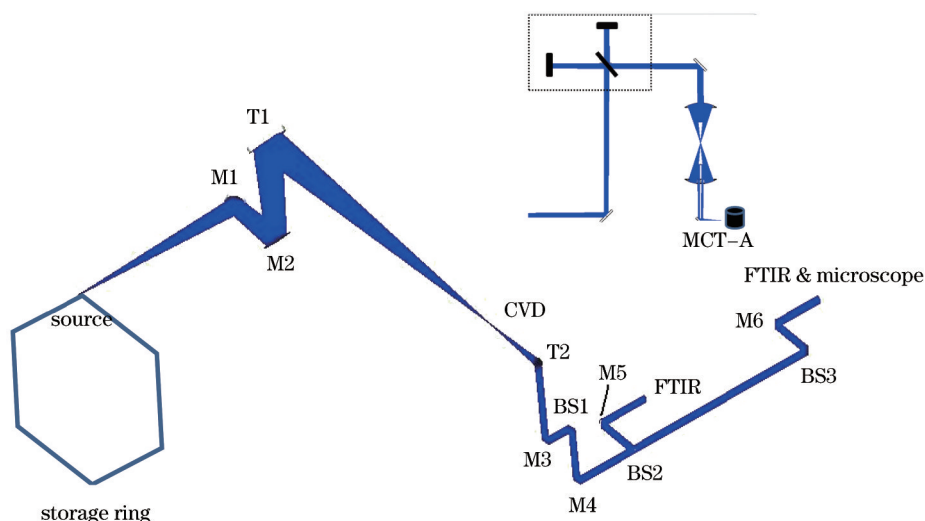


图1 BL01B1显微谱学光束线站光路图。M1:红外引出镜,M2~M6:平面镜,CVD:CVD窗,T1和T2:超环面镜,BS1~BS3:可见光/红外分束镜

Fig.1 Optical schematic diagram of microspectroscopy end station in BL01B1 beamline. M1: infrared extraction mirror, M2~M6: flat mirrors, CVD: CVD window, T1&T2: toroidal mirrors, BS1~BS3: visible/infrared light beamsplitters

从图2中可以看到,由于第三代同步辐射电子束团的尺寸非常小,波长在中红外波段对最终聚焦光斑尺寸的影响不大,在近红外波段则有一定影响。

在本文的测试中,将聚焦光斑尺寸的FWHM定义为红外显微镜的空间分辨率。实际测量时,因BL01B1

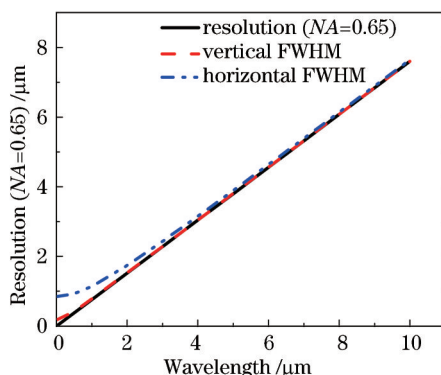


图2 考虑电子束尺寸后的光斑尺寸(FWHM)和波长之间的关系

Fig.2 Spatial resolution (FWHM) as a function of wavelength with the electron beam source size considered

红外显微谱学线站载物平台的位移精度为  $1\ \mu\text{m}$ , 使用的是中红外探测器 MCT-A, 故将测量波长范围定为  $4\sim 10\ \mu\text{m}$ 。

考虑到使用高斯函数拟合艾里斑主极大的关系, 如果线性拟合后各波长所对应空间分辨率与波长的线性关系中斜率为  $0.76\ (NA=0.65)$ , 即可认为红外显微镜的空间分辨率满足衍射极限。

### 3 实验结果

上海光源 BL01B1 红外显微谱学线站配备了 Thermofisher 公司的 Continuum XL 红外显微镜和 Nicolet 6700 光谱仪。该 Continuum XL 红外显微镜配有 MCT-A 探测器 ( $4000\sim 650\ \text{cm}^{-1}$ , 响应波长为  $2.5\sim 15.4\ \mu\text{m}$ ) 和精度为  $1\ \mu\text{m}$  的样品位移台。在测量时, 使用的是该红外显微镜所配的 32 倍 Schwarzschild 物镜, 其数值孔径为  $0.65$ 。分别使用刀口法和鉴别率板测量了该线站在使用同步辐射红外光源时的空间分辨率。

#### 3.1 刀口法测量结果

使用上海同步辐射光源 BL01B1 的同步辐射红外光作为红外显微谱学线站的光源, 红外显微镜光阑全

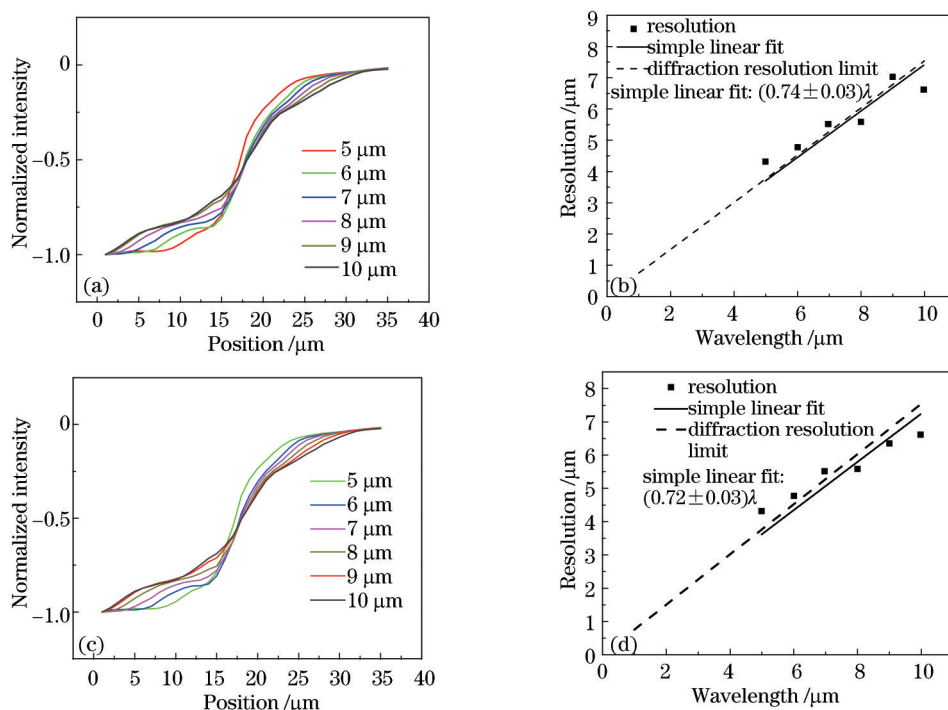


图3 使用刀口法的空间分辨率测试结果。(a)水平方向所测原始数据;(b)水平方向空间分辨率与波长的关系;(c)垂直方向所测原始数据;(d)垂直方向空间分辨率与波长的关系

Fig.3 FWHM resolution measurement results using step-edge method. (a) Example raw data in horizontal direction; (b) horizontal spatial resolution as a function of wavelength; (c) example raw data in vertical direction; (d) vertical spatial resolution as a function of wavelength

开,分别沿平台水平和垂直方向对刀片做 Mapping 扫描,分别得到聚焦光斑水平和垂直方向的空间分辨率,并进行线性拟合,得到空间分辨率与波长的关系,结果如图 3 所示。在中红外波段,水平方向拟合后的空间分辨率与波长之间的关系为 $(0.74\pm 0.03)\lambda$ ,垂直方向空间分辨率与波长之间的关系为 $(0.72\pm 0.03)\lambda$ ,表明空间分辨率满足衍射极限。

### 3.2 鉴别率板测试结果

使用鉴别率板对红外显微镜的空间分辨率进行了测试。使用同步辐射红外光作为光源,利用红外显微镜的反射模式,红外显微镜的光阑全开。鉴别率板为 Newport 公司所产 res-1 USAF-1951 型鉴别率板,所选测试区域为该鉴别率板的分辨率最高的第 7 组条纹,如图 4 所示。图 5 为鉴别率板线宽为  $2.46\ \mu\text{m}$  条纹的测量结果。根据瑞利判据,波长为  $5.07\ \mu\text{m}$  时,该组条纹是可以分辨的,如图 5(a) 所示,波长为  $5.46\ \mu\text{m}$  时,认为该组条纹可以刚好分辨,如图 5(b) 所示。

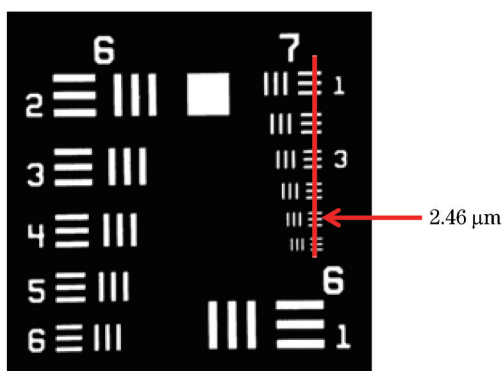


图 4 测试所用鉴别率板

Fig.4 Resolution target bars

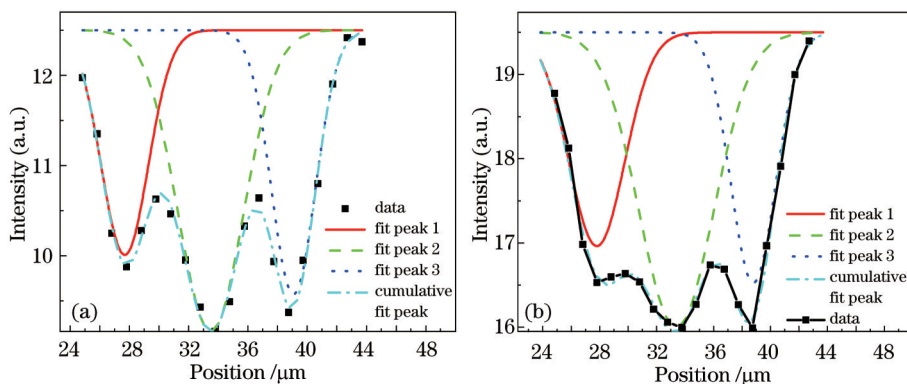


图 5  $2.46\ \mu\text{m}$  条纹处理结果。(a) 可以分辨出(波长为  $5.07\ \mu\text{m}$ ); (b) 最小可分辨(波长为  $5.46\ \mu\text{m}$ )

Fig.5 Results of the  $2.46\ \mu\text{m}$  bars. (a) Intensity profile (resolved) at  $5.07\ \mu\text{m}$ ; (b) intensity profile with the smallest bars (just resolved) at  $5.46\ \mu\text{m}$

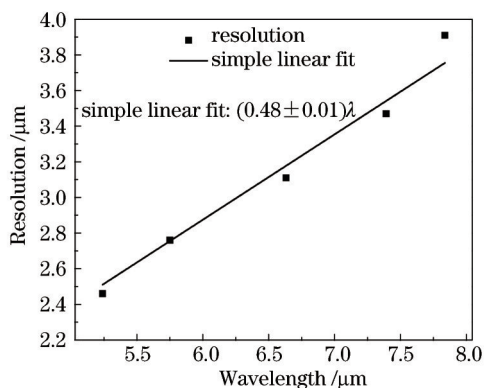


图 6 鉴别率板测试结果

Fig.6 Resolution test result using resolution target bars

鉴别率板的测试结果如图 6 所示,拟合得出的红外显微镜空间分辨率与波长的关系为 $(0.48\pm 0.01)\lambda$ 。根据瑞利判据可知,使用鉴别率板的测量结果和使用刀口法的测量结果之间存在 0.61 的系数关系<sup>[2]</sup>,即理论空间分辨率为 $0.46\lambda$ ( $NA=0.65$ )。考虑到显微镜载物平台的位移精度为 $1\ \mu\text{m}$ ,在 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 的波长范围内,其空间分辨率满足衍射极限,与刀口法所测结果基本一致。

## 4 结 论

利用刀口法和鉴别率板对上海同步辐射光源 BL01B1 红外谱学显微线站的空间分辨率进行了详细的测试。刀口法的测量结果表明,在中红外波段使用同步辐射红外光源时,红外显微镜的空间分辨率为 $(0.74\pm 0.03)\lambda$ (水平)和 $(0.72\pm 0.03)\lambda$ (垂直),与理论值 $0.76\lambda$ 非常符合。使用鉴别率板的测量结果和刀口法的测量结果一致。

综合以上测试结果,可以认为在中红外波段上海同步辐射光源 BL01B1 红外谱学显微线站的空间分辨率满足衍射极限。受限于样品位移台的精度,尚未准确测量近红外波段的空间分辨率。将在后续测量中更换精度更高的扫描台(用精度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的位移台取代现有的位移台)和近红外波段的灵敏探测器如 InGaAs 探测器,对近红外波段的空间分辨率进行更细致的测量,以得到更准确的近红外波段的空间分辨率信息。

## 参 考 文 献

- 1 Z Zhang, M Chen, Y Tong, *et al.*. Performance of the infrared microspectroscopy station at SSRF [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67(6): 521–525.
- 2 E Levenson, P Lerch, M C Martin. Spatial resolution limits for synchrotron-based spectromicroscopy in the mid- and near-infrared [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2008, 15(4): 323–328.
- 3 P Roy, M Rouzières, Z Qi, *et al.*. The AILES infrared beamline on the third generation synchrotron radiation facility SOLEIL [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, 49(1): 139–146.
- 4 H Kimura, T Moriwaki, S Takahashi, *et al.*. Infrared beamline BL43IR at SPring-8: Design and commissioning [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2001, 467: 441–444.
- 5 P Dumas, F Polack, B Lagarde, *et al.*. Synchrotron infrared microscopy at the French Synchrotron Facility SOLEIL [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, 49: 152–160.
- 6 H-Y N Holman, M C Martin, W R McKinney. Tracking chemical changes in a live cell: Biomedical applications of SR-FTIR spectromicroscopy [J]. *Journal of Spectroscopy*, 2003, 17(2–3): 139–159.
- 7 A Marcelli, A Cricenti, W M Kwiatek, *et al.*. Biological applications of synchrotron radiation infrared spectromicroscopy [J]. *Biotechnology Advances*, 2012, 30(6): 1390–1404.
- 8 P Dumas, G D Sockalingum, J Sule-Suso. Adding synchrotron radiation to infrared microspectroscopy: What's new in biomedical applications [J]. *Trends in Biotechnology*, 2007, 25(1): 40–44.
- 9 H-Y N Holman, R Miles, Z Hao, *et al.*. Real-time chemical imaging of bacterial activity in biofilms using open-channel microfluidics and synchrotron FTIR spectromicroscopy [J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(20): 8564–8570.
- 10 L G Benning, V Phoenix, N Yee, *et al.*. Molecular characterization of cyanobacterial silicification using synchrotron infrared microspectroscopy [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(4): 729–741.
- 11 M Cotte, P Dumas, Y Taniguchi, *et al.*. Recent applications and current trends in cultural heritage science using synchrotron-based Fourier transform infrared micro-spectroscopy [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2009, 10(7): 590–600.
- 12 Gao Yuan, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. New algorithm of knife-edge method measuring the size of hat spot and Gaussian spot [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 261–264.  
高 源, 樊仲维, 余 锦, 等. 刀口法测平顶光斑和高斯光斑半径的新算法[J]. *激光技术*, 2013, 37(2): 261–264.
- 13 Zhang Xiaolin, Du Guohao, Deng Biao, *et al.*. High precision measurement of modulation transfer function for X-ray CCD with knife-edge method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1680–1687.  
张晓琳, 杜国浩, 邓 彪, 等. 刀口法高精度测量 X 射线 CCD 调制传递函数研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1680–1687.
- 14 Fan Ke, Tian Ailing. Study on numerical simulation of knife-edge test to surface shape [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(1): 011205.  
范 珂, 田爱玲. 刀口法检测光学元件面形的数值模拟研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(1): 011205.

栏目编辑: 吴秀娟