

铒离子注入绝缘体上Si的射程分布研究*

秦希峰[†] 马桂杰 时术华 王凤翔 付刚 赵金花

(山东建筑大学理学院, 济南 250101)

(2013年12月11日收到; 2014年5月16日收到修改稿)

利用离子注入掺杂技术设计、制作半导体集成器件时, 了解离子注入半导体材料的射程分布和横向离散规律等是很重要的. 用200—500 keV能量的铒(Er)离子注入SOI(silicon-on-insulator, 绝缘体上的硅)样品中, 利用卢瑟福背散射(RBS)技术研究了剂量为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的Er离子注入SOI的平均投影射程 R_p 和射程离散 ΔR_p , 把测出的实验值和SRIM软件得到的理论计算值进行了比较, 发现平均投影射程 R_p 的实验值跟理论计算值符合较好, 射程离散 ΔR_p 的实验值和理论计算值差别大一些.

关键词: 离子注入, 绝缘体上Si, 投影射程和射程离散, 卢瑟福背散射技术

PACS: 61.72.uf, 61.72.sh

DOI: 10.7498/aps.63.176101

1 引言

硅(Si)是现代半导体工业中应用非常广泛的半导体材料, 以Si和GaAs为代表的传统半导体材料的高速发展极大地推动了微电子技术的迅猛发展. 由于 Er^{3+} 离子的4f-4f发光的波长为 $1.54 \mu\text{m}$, 对于光纤通讯石英玻璃具有最小的光吸收, 对于光纤通讯的发展具有重要的意义. 掺铒Si是预期能在室温发出波长为 $1.54 \mu\text{m}$ 光的材料之一, 对于Si掺入Er的 $1.54 \mu\text{m}$ 发光的研究受到了人们的高度重视, 国内外科研工作者在Er离子注入Si掺杂的射程分布、退火行为和光致发光等做了大量研究工作^[1-9]. 随着微波器件、功率器件的不断发展, 由于传统的Si材料本身存在的性能缺陷, 在这一领域越来越显示出一定的局限性. SOI材料以其在电学与光学特性以及制作工艺和成本等方面巨大的优势越来越受到研究人员的高度重视. 近年来, 人们对Er离子注入SOI材料的光致发光等方面做了大量的研究工作^[10-14], 但很少有关注稀土元素注入SOI材料的射程分布和退火行为的研究. 虽然SOI顶层材料依然是晶体Si, 但一般是一层晶体Si薄

膜, 当注入的离子到达 SiO_2 层时, 其射程分布将会跟体Si材料有所不同. 即使注入的离子没有到达 SiO_2 层时, 由于 SiO_2 层的存在, 其退火行为也会有所不同, 在一定条件下, 会形成 $\text{SiO}_2/\text{Si}(\text{Er})/\text{SiO}_2$ 异质结, 还可能形成Si量子阱, 这些都将会影响其光学和电学行为, 因此研究稀土元素注入SOI材料的投影射程分布和退火行为等依然具有极高的应用价值.

本文利用200—500 keV能量的Er离子注入SOI中, 用RBS技术研究其平均投影射程和射程离散. 利用计算机模拟软件SRIM 2011(Stopping and Range of Ions in Matter)^[15]的TRIM(Transport of Ions in Matter)程序对Er离子注入SOI的深度射程分布进行了理论模拟计算, 并把理论计算值跟实验测量值进行了比较, 以期为利用Er离子注入SOI掺杂制作半导体集成器件提供参考依据.

2 实验

本论文工作我们采用了三种SOI样品, 样品1是德国Peter Gruenberg研究所生产的, 顶层晶Si

* 国家自然科学基金(批准号: 11205096)、山东省自然科学基金(批准号: ZR2011AM011, ZR2013AM014)、山东建筑大学博士基金(批准号: XNBS1341)和济南市科技发展项目(批准号: 201202092, OUT_02440)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: xfqin@sdjzu.edu.cn

的厚度为 300 nm, SiO₂ 层厚度为 500 nm; 样品 2 和样品 3 是上海新傲科技有限公司生产的, 样品 2 的顶层晶 Si 厚度为 260 nm, SiO₂ 层厚度为 150 nm; 样品 3 的顶层晶 Si 厚度为 220 nm, SiO₂ 层厚度为 3000 nm. Er 离子注入是在中国科学院半导体所的 500 keV 离子注入机上进行的. 在室温下, 分别利用 200 keV, 300 keV, 400 keV 和 500 keV 能量的 Er 离子垂直注入(实际上, 为了减少注入晶体时沟道效应的影响, 注入时使样品法线相对注入束流方向偏离 7°, 此角度远大于沟道临界角, 由此引起的射程测量的误差小于 1%, 在实验误差范围内)SOI 样品中. Er 离子的注入剂量均为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. 为避免由于束流过大引起的过热效应, 注入过程中, 束流密度小于 $1 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$.

在山东大学的 1.7 MV 串列加速器上进行了 RBS 测量, ⁴He²⁺ 离子束垂直 SOI 样品表面入射, 金硅面垒探测器探测散射角为 165° 的背散射离子, 利用多道分析仪采谱并将所得到的背散射谱输入计算机进行处理, 系统的能量分辨率由金膜背散射谱表面高度的 12%—88% 之间给出. 分析 He 束流的强度为 10 nA 左右. RBS 测量都是在真空度为 $2.6 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 的压强下进行的.

3 实验结果和讨论

低能重离子注入到 SOI 中的射程分布可以利用高斯分布较好地描述. 当离子的射程分布呈高斯分布时, 可以用平均投影射程 R_p 和射程离散 ΔR_p 来描述其射程分布. 由于低能 Er 离子在 SOI 样品中的射程较小, 在 Er 离子分布的区域内, 可以利用表面能量近似法将能量谱转化为深度谱, 从而求出 R_p 和 ΔR_p . 平均投影射程为 [16]

$$R_p = \frac{\Delta E}{N[\epsilon_0]_{\text{Er}}^{\text{Si}}}, \quad (1)$$

式中, ΔE 为根据能量定标求出的 Er 离子的表面位置跟谱峰位置的能量差, N 为 Si 分子数密度, $[\epsilon_0]_{\text{Er}}^{\text{Si}}$ 为阻止截面因子 [16],

$$[\epsilon_0]_{\text{Er}}^{\text{Si}} = \frac{K_{\text{Er}}}{\cos \theta_1} \epsilon^{\text{Si}}(E_0) + \frac{1}{\cos \theta_2} \epsilon^{\text{Si}}(K_{\text{Er}} E_0),$$

其中, $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 165^\circ$ 分别为 RBS 测量时 He 离子的入射角和散射角, K_{Er} 是 He 在 Er 原子核上发生散射的运动学因子, He 离子的入射能 $E_0 = 2.1 \text{ MeV}$, ϵ^{Si} 为 Si 的阻止截面, 由文献 [16] 的附表中给出.

平均投影射程离散可以由 Er 离子背散射谱的半高度宽 (FWHM) w 中求出, 但 w 中包含了系统分辨率和 He 离子能量离散, 必须消除其影响, 给出修正的 w_C . 在本论文中, 假定系统分辨率 w_S 和 He 离子能量离散 w_B 均为高斯分布, 则

$$w_C^2 = w^2 - w_S^2 - w_B^2.$$

平均投影射程离散为 [16]

$$\Delta R_p = \frac{w_C}{2 \ln 2 N[\epsilon_0]_{\text{Er}}^{\text{Si}}}. \quad (2)$$

图 1 表示 400 keV 的 Er 离子以 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的剂量垂直注入 SOI 样品 1 的 RBS 谱.

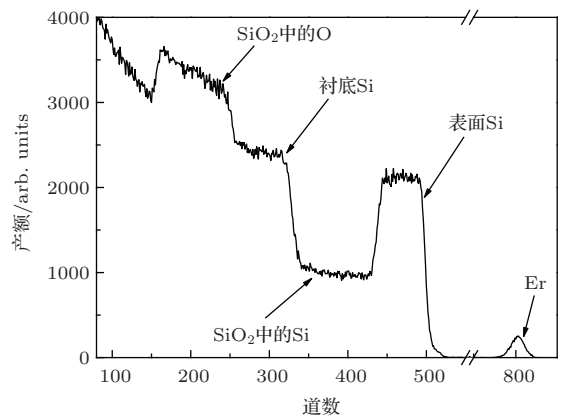


图 1 400 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 Er 离子垂直注入 SOI 样品 1 的 RBS 谱

为便于测量和计算, 图 2 给出了 400 keV 的 Er 离子以 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的剂量注入 SOI 样品 1 中测得 RBS 谱 Er 部分的分布曲线, 图中实线为拟合的高斯分布曲线. 由图 2 可看出, Er 在 SOI 样品 1 中的分布呈较好的高斯分布, 因此可用表面能量近似法将能量谱转化为深度谱计算其平均投影射程和射程离散.

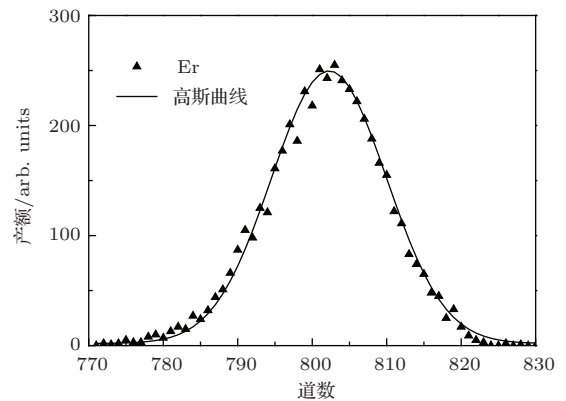


图 2 400 keV Er 离子注入 SOI 样品 1 的 Er 分布曲线 (图中实线为拟合的高斯分布曲线)

根据测量数据, 我们利用(1), (2)式计算出了400 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ Er注入SOI样品1的平均投影射程和射程离散分别为

$$R_p = 141.4 \text{ nm},$$

$$\Delta R_p = 39.8 \text{ nm}.$$

我们用SRIM 2011软件的TRIM计算程序对400 keV Er离子注入SOI样品的平均投影射程和射程离散进行了理论模拟, 计算出的平均投影射程和射程离散分别为132.8 nm和32.2 nm. 把400 keV Er离子注入SOI样品的 R_p 和 ΔR_p 理论模拟结果和实验结果进行比较可看出, 理论模拟值都比实验值小, 平均投影射程的差别为6.1%, 射程离散的差别为19.1%.

表1总结了用RBS技术测量得到的注入能量 $E = 200 \text{ keV}, 300 \text{ keV}, 400 \text{ keV}$ 和 500 keV 的Er离子注入SOI样品1的平均投影射程 R_{pE} 和射程离散 ΔR_{pE} 以及用TRIM计算程序模拟得到的平均投影射程 R_{pT} 和射程离散 ΔR_{pT} .

表1 平均投影射程和射程离散的实验值和模拟值汇总

| E/keV | R_{pE}/nm | R_{pT}/nm | $\Delta R_{pE}/\text{nm}$ | $\Delta R_{pT}/\text{nm}$ |
|----------------|--------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| 200 | 84.6 | 78.1 | 25.1 | 19.1 |
| 300 | 114.8 | 105.8 | 32.4 | 25.6 |
| 400 | 141.4 | 132.8 | 39.8 | 32.2 |
| 500 | 172.2 | 159.1 | 45.6 | 36.6 |

由表1可看出, 不同能量Er离子注入SOI样品1的所有平均投影射程和射程离散的实验值均大于理论计算值, R_p 的理论模拟结果和实验结果符合好, 最大相差约8%; ΔR_p 的理论模拟值和实验值差别明显过大, 最大相差24%. 导致 R_p 和 ΔR_p 的理论模拟值和实验值出现差别的因素主要有Er离子注入时能散、 ΔE 的测量误差和Si的阻止截面 ϵ^{Si} 的取值不同等, 一般情况下, 前两项引起的误差较小, 一般在1%左右, 我们计算了 ϵ^{Si} 的取值不同而产生的 R_p 和 ΔR_p 的理论模拟值和实验值的差别约为6%, 故 R_p 的理论模拟结果和实验结果的差别应该是由以上因素产生的, 但 ΔR_p 的理论模拟值和实验值偏差太大, 还应该存在其他因素. 我们认为可能是由离子注入过程中辐射增强扩散和电荷态起伏造成的, 由于离子注入过程中的辐射增强扩散以及离子在贯穿靶材料时的电荷态起伏可能增大射程分布的宽度^[17], 而TRIM程序没有考虑这两种效应.

图3表示500 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ Er离子注入SOI样品2的RBS谱.

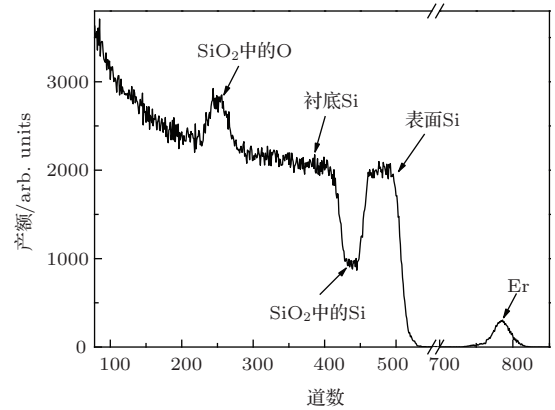


图3 500 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的Er离子垂直注入SOI样品2的RBS谱

图4给出了500 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ Er离子注入SOI样品2的RBS谱Er部分的分布曲线, 图中实线为拟合的高斯分布曲线.

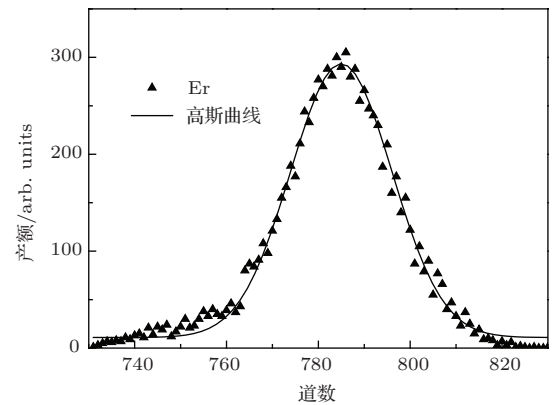


图4 500 keV Er离子注入SOI样品2的Er分布曲线(图中实线为拟合的高斯分布曲线)

由图4可看出, Er在SOI样品2中的分布大部分呈较好的高斯分布, 只是在763道以下的RBS产额有一定突降, 且明显偏离高斯分布, 但其射程分布和射程离散仍可用表面能量近似法^[16]计算. 根据图4测得的数据, 我们利用表面能量近似法计算出了剂量为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的500 keV Er离子注入SOI样品2中的平均投影射程和射程离散分别为

$$R_p = 174.5 \text{ nm},$$

$$\Delta R_p = 44.7 \text{ nm}.$$

这和500 keV Er离子注入SOI样品1中的平均投影射程和射程离散是相符合的.

图5给出了500 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ Er离子在SOI样品2中的深度分布(图中实心方块). 图中还

给出了 500 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ Er 离子注入单晶 Si 中的深度分布 (图中折线). 比较两图形可看出它们大部分符合的较好. 但在 SOI 样品 2 中, 距表面 260 nm 处 (表面 Si 和 SiO₂ 交界处), RBS 产额有一定突降, 在 SiO₂ 层有明显的拖尾现象, 这是由于 Er 原子进入了 SiO₂ 层, 主要是 SiO₂ 密度比 Si 小造成的.

图 6 画出了 500 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ Er 离子注入 SOI 样品 3 的 RBS 谱.

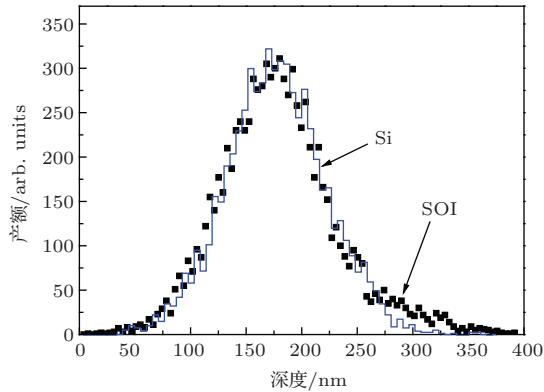


图 5 500 keV Er 离子注入 SOI 样品 2 的深度分布曲线

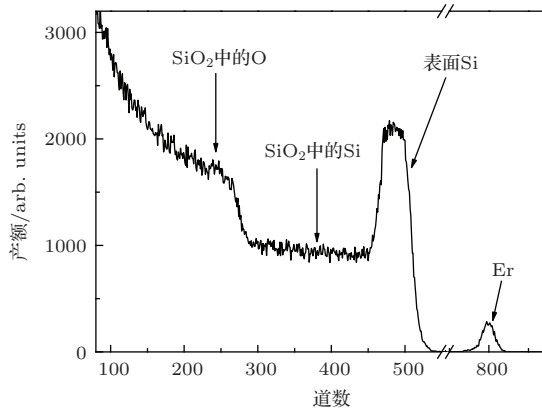


图 6 500 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 Er 离子垂直注入 SOI 样品 3 的 RBS 谱

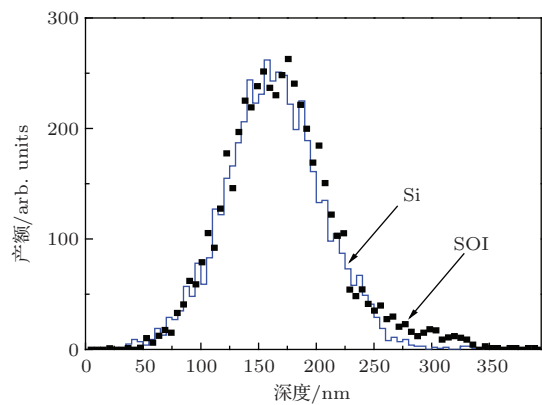


图 7 500 keV Er 离子注入 SOI 样品 3 的深度分布曲线

图 7 给出了 500 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ Er 离子在 SOI 样品 3 中的深度分布 (图中实心方块). 作为比较, 图中还给出了 500 keV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ Er 离子注入单晶 Si 中的深度分布 (图中折线). 比较两图形, 可见它们符合得较好. 但在 SOI 样品 3 中, 距表面 220 nm 处 (表面 Si 和 SiO₂ 交界处) 的 RBS 产额有一个明显的突降, 220 nm 后 (SiO₂ 层) 有明显的拖尾现象, 这是由于 Er 原子进入了 SiO₂ 层, 主要是 SiO₂ 密度比 Si 的密度小造成的.

4 结 论

利用 RBS 技术研究了能量为 200—500 keV、剂量为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 Er 离子注入 SOI 样品的平均投影射程 R_p 和射程离散 ΔR_p , 测出的实验值和计算机模拟软件 SRIM2011 得到的理论模拟值进行了比较, 发现 R_p 的实验值跟理论值符合较好, ΔR_p 的实验值和理论值差别大一些, SRIM 软件模拟射程离散 ΔR_p 时需要进行一些修正. 当注入能量较高时, Er 离子会穿过表面 Si 和 SiO₂ 层界面, 进入 SiO₂ 层. 在表面 Si 和 SiO₂ 交界处, RBS 产额有一个明显的突降, 在 SiO₂ 层有明显的拖尾现象, 这主要是 SiO₂ 密度比 Si 的密度小造成的.

参考文献

- [1] Ennen H, Schneider J, Pomrenke G, Axmann A 1983 *Appl. Phys. Lett.* **43** 943
- [2] Xiao Z S, Xu F, Zhang T H, Cheng G A, Gu L L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 164 (in Chinese) [肖志松, 徐飞, 张通和, 程国安, 顾岚岚 2009 物理学报 **58** 164]
- [3] Wang J Z, Shi Z Q, Lou H N, Zhang X L, Zuo Z W, Pu L, Ma E, Zhang R, Zheng Y L, Lu F, Shi Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4243 (in Chinese) [王军转, 石卓琼, 娄昊楠, 章新荣, 左则文, 濮林, 马恩, 张荣, 郑有焘, 陆昉, 施毅 2009 物理学报 **58** 4243]
- [4] Hansson G V, Du W X, Elfving A, Duteil F 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2104
- [5] Lei H B, Yang Q Q, Wang Q M 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1201 (in Chinese) [雷红兵, 杨沁清, 王启明 1998 物理学报 **47** 1201]
- [6] Liang J J, Chen W D, Wang Y Q, Chang Y, Wang Z G 2000 *Chin. Phys.* **9** 783
- [7] Ding W C, Liu Y, Zhang Y, Guo J C, Zuo Y H, Cheng B W, Yu J Z, Wang Q M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3044
- [8] Chen C Y, Chen W D, Wang Y Q, Song S F, Xu Z J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 736 (in Chinese) [陈长勇, 陈维德, 王永谦, 宋淑芳, 许振嘉 2003 物理学报 **52** 736]
- [9] Qin X F, Chen M, Wang X L, Liang Y and Zhang S M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 113403

- [10] Galli M, Politi A, Belotti M, Gerace D, Liscidini M, Patrini M, Andreani L C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **81** 251114
- [11] Qin X F, Li H Zh, Li S, Ji Z W, W H N, Wang F X, Fu G 2012 *Chin. Phys. B* **21** 066105
- [12] Barrios A, Lipson M 2005 *Opt. Express* **13** 10092
- [13] Zelsmann M, Picard E, Charvolin T, Hadji E, Heitzmann M 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2542
- [14] Qin X F, Ji Z Wu, Chen M, Liu X H, Wang X L, Wang K M, Zhao Q T, Fu G 2012 *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* **278** 1
- [15] Ziegler J F <http://www.srim.org> [2012-06-29]
- [16] Chu W K, Mayer J W, Nicolet M A 1978 *Backscattering Spectrometry* (New York: Academic) chap 5, p137–141
- [17] Liu X D 2003 *Ph. D. dissertation* (Jinan: Shandong University) (in Chinese) [刘向东 2003 博士学位论文 (济南: 山东大学)]

Investigation on range distribution of Er ions implanted in silicon-on-insulator*

Qin Xi-Feng[†] Ma Gui-Jie Shi Shu-Hua Wang Feng-Xiang Fu Gang Zhao Jin-Hua

(College of Science, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

(Received 11 December 2013; revised manuscript received 16 May 2014)

Abstract

It is very important to take into consideration the distribution of range, range straggling, and lateral spread of ions implanted into semiconductor materials during designing and fabrication of semiconductor integration devices by means of ion implantation. Er ions with energies between 200 and 500 keV are implanted in SOI (silicon-on-insulator) samples. The mean projection range R_p and the range stragglings ΔR_p of Er ions with a dose of $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ implanted in SOI samples are measured by Rutherford backscattering (RBS) technique. The obtained data are then compared with those predicted by TRIM codes. It is seen that the experimental data of R_p agree well with the theoretical values. However, there are great differences between the experimental data and the theoretical values of ΔR_p .

Keywords: ion implantation, silicon-on-insulator, projected range and range straggling, Rutherford backscattering technique

PACS: 61.72.uf, 61.72.sh

DOI: 10.7498/aps.63.176101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11205096), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant Nos. ZR2011AM011, ZR2013AM014), the Foundation for Docotors of Shandong Jianzhu University, China (Grant No. XNBS1341), and the Science and Technology Development Plan of Jinan City, China (Grant No. 201202092, OUT_02440).

[†] Corresponding author. E-mail: xfqin@sdjzu.edu.cn