

文章编号 :1004-5929(2004)03-0203-05

小尺寸 Si/Ge 量子点内应变和组分的拉曼光谱表征*

谭平恒^{1,2}, 周霞¹, 杨富华¹, K. Brunner², D. Bougeard², G. Abstreiter²

(1. 半导体超晶格国家重点实验室, 中科院半导体研究所, 北京, 100083;

2. Walter Schottky Institut, Technische Universität München, D-85748 Garching, Germany)

摘 要: 本文详细地研究了原始生长和退火处理后的 Si/Ge 量子点的拉曼光谱。我们观测到了 Si/Ge 量子点的一系列本征的拉曼振动模以及 Ge-Ge 模的 LO 和 TO 声子峰间 4.2cm^{-1} 的频率劈裂。通过这些参数, 我们自洽地确定了原始生长的平面直径为 20nm 和高为 2nm 的 Si/Ge 量子点内 Ge 的平均组分为 80%, 平均应变为 -3.4% 。分析清楚地表明了这种小尺寸的 Si/Ge 量子点内的应变仍遵从双轴应变, 并且应变的释放主要由量子点和 Si 隔离层间 Si-Ge 原子互扩散决定。

关键词: 量子点; 拉曼光谱; 应变; 组分; Si-Ge 原子互扩散

中图法分类号: O657.37 文献标识码: A

Raman Characterization of Strain and Composition in Small-sized Self-assembled Si/Ge Dots

TAN Ping-heng^{1,2}, ZHOU Xia¹, YANG Fu-hua¹, BRUNNER K.²,
BOUGEARD D.², ABSTREITER G.²

(1. State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, P. O. Box 912, Beijing 100083, P. R. China; 2. Walter Schottky Institut, Technische Universität München, D-85748 Garching, Germany)

Abstract: A detailed Raman characterization of the structural properties of as-grown and annealed self-assembled Si/Ge dot multilayers is reported in this paper. Several new modes in as-grown or annealed Si/Ge dots and a frequency splitting of 4.2cm^{-1} between LO and TO Ge-Ge modes in as-grown Si/Ge dots are observed in Raman spectra. An average Ge content of 0.8 and lateral strain of -3.4% are consistently obtained from these spectral features for as-grown Si/Ge dots with a lateral size of about 20 nm and a height of about 2 nm. It suggests that a certain amount of intermixing between Si spacer layers and Si/Ge dots takes place for the Si/Ge dot multilayers. The results show that the LO-TO frequency splitting of the Ge-Ge mode and the frequencies of the Ge-Ge and Ge-Si modes can be used as an efficient way to determine the average strain and composition in uncorrelated small-sized Si/Ge dot multilayers in which the mean strain field is close to the biaxial case.

Key words: Quantum dots; Raman scattering; strain; composition; Si-Ge intermixing

在 Si 上自组织生长 Si/Ge 量子点因其结构上的独特性, 被认为是可能实现 Si 基发光的一个重要途径。此外 Ge 在 Si 上 4.2% 的晶格失配可以让人们制造大小尺寸不同的纳米结构, 还可适应其它多

种器件需要,如单电子晶体管和红外探测器等^[1]。由于应变诱导自组织 Si/Ge 量子点里组分和应变的分布直接决定了其光学和电学性质,如何确定 Si/Ge 量子点里的应变和组分分布是 Si/Ge 外延生长系统的一个非常重要的课题。为了满足各种光电子器件的需要,人们通常利用分子束外延系统自组织生长厚度只有几个纳米的小尺寸 Si/Ge 量子点。由于生长这类量子点时的衬底温度比较低,这些厚度小于 3.0nm 的 Si/Ge 量子点里的 Ge 组分通常比较高^[2]。但是,如何定量地表征这种小尺寸量子点的组分和应变仍然是目前有待解决的问题^[3]。在本文中,我们详细地研究了分子束外延设备制备的小尺寸 Si/Ge 量子点多层结构的拉曼光谱。我们观测到了非常完整的 Si/Ge 量子点体系的拉曼光谱特征。利用这些光谱特征,我们自洽地表征了厚度小于 3.0nm 的 Si/Ge 量子点里的平均应变和 Ge 的组分。

我们所研究的 Si/Ge 量子点样品是用一固态源分子束外延(MBE)设备在(001)取向的 Si 衬底上自组织生长的^[1]。我们在衬底上生长了 150nm 厚的 Si 缓冲层,然后是以 8 原子单层(ML)的 Ge 量子点和 25nm 的 Si 隔离层为单元的 80 周期复合结构和 100nm 的 Si 覆盖层。Si/Ge 量子点生长时的衬底温度维持在 510℃。为了研究 Si/Ge 量子点样品中 Ge 浸润层(WL)对拉曼光谱的贡献,我们生长了一个结构基本上与上面量子点结构完全一样的参考样品,只是其中的 8ML Ge 层被替代为 4 ML 的 Ge 层。Figure 1 中的插图给出了 Ge 量子点样品的原子力显微镜(AFM)图像。从图中可知,我们生长的 Si/Ge 量子点的横向尺寸为 20nm 左右,其厚度为 2nm, Si/Ge 量子点的面密度为 $1.5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 。由于 Si 隔离层的厚度大于 14nm,生长的各层 Si/Ge 量子点间是非垂直关联的。拉曼谱是用光谱分辨率为 3.8cm^{-1} 的三光栅拉曼光谱仪上以背散射配置做的。氦离子激光器的 514.5nm 激光用来做拉曼谱的激发线,激光聚焦到样品上的光斑直径大约为 $1 \mu\text{m}$,入射到样品上的激光功率为 1mW。偏振拉曼谱里符号 $x, y, z, x',$ 和 y' 表示的方向分别平行于样品衬底的 $[100], [010], [001], [1-10]$ 和 $[110]$ 等晶轴方向。

Fig. 1 给出了 Si/Ge 量子点多层结构,浸润层参考样品(001)Si 和(001)Ge 衬底的拉曼谱。Fig. 1 下面部分的 Si 衬底和浸润层参考样品的硅纵光学(LO)模的强度都参照多层 Si/Ge 量子点样品相应的拉曼峰进行了归一化。显然,由于 Si/Ge 量子点和 Ge 浸润层参考样品中都含有 Si 隔离层,因此它们的一些拉曼峰和 Si 的拉曼峰类似^[4],例如位于 $225, 435$ 和 620cm^{-1} 的拉曼峰分别来源于 Si 隔离层 $2\text{TA}(L), 2\text{TA}(\Sigma)$ 和布里渊区 Σ 方向光学和声学声子的组合模等的双声子拉曼散射。尽管 Si 衬底位于 301cm^{-1} 附近的 $2\text{TA}(X)$ 倍频模非常靠近 Ge 体材料和 Si/Ge 量子点中 Ge 的一阶光学模,但是 Si/Ge 量子点样品位于 307cm^{-1} 的强度非常高,峰位又与 Si 的 $2\text{TA}(X)$ 显著不同,这清晰地揭示了其 Ge-Ge 光学模的特征。相反,WL 参考样品相对于 Si 衬底并没有显示出两者的拉曼谱有什么不同。为了获得 Si/Ge 量子点和本征拉曼谱,我们将 Si/Ge 量子点拉曼谱减去 Si 衬底的拉曼谱所获得的结果显示于 Fig. 1 的上半部分,其位于 $307.5 \text{cm}^{-1}, 421.5 \text{cm}^{-1}$ 和 595cm^{-1} 的三个强拉曼峰分别被指认为 Ge-Ge, Si-Ge 和 2Ge-Ge 光学模。根据 Si/Ge 合金的相关实验结果^[5],我们指认位于 170cm^{-1} 的宽拉曼峰为 Si/Ge 量子点内 2TA 声子的拉曼散射。

根据 Ge 量子点的尺寸和其面密度,我们估计 Si/Ge 量子点样品大约有 60% 的表面被量子点覆盖。如果量子点间 Ge 浸润层的厚度为 4ML,将有 80% 的 Ge 材料在量子点内。从 Fig. 1 可以看出,

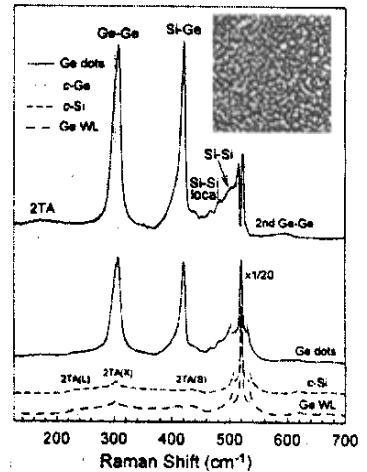


Fig. 1 Raman spectra of a Si/Ge dot sample (solid lines), c-Si (dashed lines) and Ge WL reference.

除了在 409cm^{-1} 附近有一弱小的 Si-Ge 拉曼峰外, Ge WL 样品的拉曼谱与 Si 衬底的非常相似。考虑到 Ge WL 样品中 Ge 的数量是 Si/Ge 量子点样品内 Ge 浸润层的 2.5 倍, 量子点样品内来源于 Ge 浸润层的拉曼信号对量子点拉曼谱的贡献是可以忽略不计的。因此, Fig. 1 上半部分 Si/Ge 量子点样品中与 Ge 相关的拉曼模主要来源于 Si/Ge 量子点, 而非量子点样品中的浸润层。此结果可以进一步从共振拉曼散射的有关结果和相关的理论计算结果得到证实^[6]。由于 2.41eV 的光子能量与所研究的 Si/Ge 量子点的直接带隙能量 E_0 非常靠近, Si/Ge 量子点内的 Ge-Ge 声子会被 514.5nm 的激光共振激发, 而对于来源于 Ge WL 的拉曼信号却不会被共振激发。

Si/Ge 量子点位于 595cm^{-1} 倍频光学模的观测说明了 Si/Ge 量子点具有较高的 Ge 组分。研究表明, 应变弛豫的 Si/Ge 合金 2TA 拉曼模的频率随合金中 Ge 组分的改变而变化, 可以从 160cm^{-1} ($x_{\text{Ge}}=1.0$) 变化到 300cm^{-1} ($x_{\text{Ge}}=0$)^[5]。理论计算表明, 压应变会适当降低 2TA 模的频率^[7]。考虑到 Si/Ge 样品中存在的压应变, 在非应变下所观测到的 2TA 模的频率大约为 180cm^{-1} 。此频率与 Ge 组分 x_{Ge} 为 0.8 的 SiGe 合金的 2TA 拉曼模的频率相同。当生长样品的衬底温度从 700°C 变化到 500°C 时, 未覆盖 Si 的 Ge 量子点内 Ge 组分会从 0.5 变化到 1.0。^[2] 当 Ge 量子点被 Si 覆盖时, Si/Ge 量子点和覆盖层间的原子互扩散决定于覆盖层的生长温度。当其生长温度为 300°C 时, Ge 与 Si 间的互扩散被完全抑制了^[8]。通过拉曼测量, 我们清晰地显示了 Si 隔离层和 Si/Ge 量子点间在生长过程中发生了相当数量的互扩散。Si/Ge 量子点内 20% 的 Si 主要来源于较高生长温度 (510°C) 所导致的 Si 隔离层和 Ge 量子点间的原子互扩散。

当减去纯 Si 的拉曼信号后, Si/Ge 量子点剩余的拉曼谱显示出几个分别位于 $440, 468, 482$ 和 501cm^{-1} 处的弱小拉曼峰。位于 $440, 468$ 和 482cm^{-1} 的三个被指认为 Si 原子四个最近邻原子分别被一个和多个 Ge 原子替代后形成的 Si-Si 局域振动模 ($\text{Si-Si}_{\text{loc}}$), 其中位于 440cm^{-1} 的局域 Si-Si 模可以清晰地与纯 Si 位于 435cm^{-1} 的 2TA (Σ) 振动模区别开来。富 Si 的 SiGe 合金通常在 430cm^{-1} 附近有一强的 Si-Si 局域模。Si/Ge 量子点中较弱的 Si-Si 局域模说明了 Si/Ge 量子点具有较低的 Si 组分。Si/Ge 量子点中三个位于 $440, 468$ 和 482cm^{-1} 的 Si-Si 局域模的频率分别比应变弛豫的 $\text{Si}_{0.2}\text{Ge}_{0.8}$ 合金内相应的局域模高 $15, 26$ 和 25cm^{-1} 。位于 501cm^{-1} 处的量子点 Si-Si 合金模的频率也比应变弛豫的 $\text{Si}_{0.2}\text{Ge}_{0.8}$ 合金的 Si-Si 模频率高 36cm^{-1} , 其非常弱的强度说明此模不是来源于 Si/Ge 量子点周围的富 Si

区域, 而是来源于 Si/Ge 量子点内部的富 Ge 区域。我们认为是 Si/Ge 量子点内部的应变导致了 Si/Ge 量子点内局域 Si-Si 振动模和 Si-Si 光学模频率相对于应变弛豫的 SiGe 合金相应拉曼模频率的增加。应变诱导的光学模频率移动 $\Delta\omega$ 正比于 (001) 平面内的双轴应变 ϵ_{xx} , $\Delta\omega = b \epsilon_{xx}$, 其中 b 是 SiGe 合金相应拉曼模的声子频率应变移动系数。对于 Si-Si 振动模, 当 x_{Ge} 为 0.8 时^[9], $b_{\text{Si-Si}} = -1050\text{cm}^{-1}$ 。因此, 从 Si/Ge 量子点内 Si-Si 光学模的频率, 我们得到量子点的富 Ge 区域内的平均应变为 -3.4% 。

为了进一步证实原始生长 Si/Ge 量子点内组分和应变对光学模的影响, 我们采用不同的散射配置选择性地测量了 Si/Ge 量子点的横向和纵向光学振动模。Fig. 2 给出了在 (001) 表面和 (110) 表面利用背散射配置测量的 Si/Ge 量子点多层结构的偏振拉曼光谱。根据纯 Si 和 SiGe 超晶格拉曼散射的选择定则^[10], 在 $(x', x')-z$ 散射配置下, LO 声子是拉曼活性的, 但在 $(x', y')-z$ 配置下, 所有

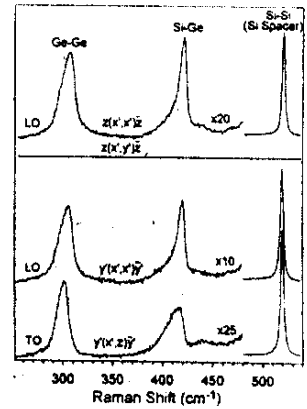


Fig. 2 Polarization dependence of Raman spectra of Si/Ge dot sample measured at the (001) plane (Top) and the polished (110) plane (Bottom).

拉曼模都是禁戒的。相对于通常的(001)背散射情况,在 $y'(x', x') - y'$ 和 $y'(x', z) - y'$ 散射配置下,我们将分别能观测到 LO 和 TO 声子模。从 Fig. 2 可以看出,小尺寸 Si/Ge 量子点拉曼谱的选择定则和纯 Si 和 Si/Ge 超晶格的一致。但是,我们观测到了 LO 和 TO Ge-Ge 声子模之间频率为 4.2 cm^{-1} 的劈裂值,此劈裂值主要是由 Si/Ge 量子点内的应变造成的。当我们象 Si/Ge 超晶格那样只考虑双轴应变的情况时^[3], Si/Ge 量子点内双轴应变诱导的 LO 和 TO 声子模之间的频率劈裂为

$$\delta\omega_{split} = \frac{1}{2\omega_0} \frac{2C_{12} + C_{11}}{C_{11}} (q - p) \epsilon_{xx} \quad (1)$$

其中 C_{12} 和 C_{11} 为材料的刚度系数, p 和 q 为 Ge 光学声子的形变势, ω_0 为 SiGe 合金光学声子模的频率。利用参考文献^[1]中 Table I 里的参数,我们从 LO 和 TO 声子频率劈裂的数值可以计算出 Si/Ge 量子点内的平均应变为 -3.5% 。对于 Si/Ge 量子点的 LO 声子模,此数值会诱导 14.5 cm^{-1} 的频率移动。量子点的光学模相对于体材料的频率移动主要由三方面决定,即量子点内的组分和应变以及光学模的量子受限效应。对于厚度为 2 nm 的 Si/Ge 量子点,量子受限效应所诱导的 Ge-Ge 光学模的频率移动大约为 -1 cm^{-1} 。因此,由于 Si/Ge 量子点内存在一定的 Si 组分所引起的 Ge-Ge 光学模频率移动数值为 -6.2 cm^{-1} 。根据没有应变的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金其光学模频率与 Si 组分的关系^[12], Si/Ge 量子点内的 Ge 组分为 0.82 。

从 Ge-Ge 光学模 LO 和 TO 频率的劈裂所得到的 Si/Ge 量子点内 Ge 组分和应变与从 2TA 和 Si-Si 模的频率所得到的数值非常吻合。根据 Vegard 定量, Si/Ge 量子点内富 Ge 区域约 -3.4% 的应变对应于生长在(001) Si 衬底上的赝 $\text{Si}_{0.19}\text{Ge}_{0.81}$ 合金。此合金与 Si/Ge 量子点内富 Ge 区域基本上有相同的 Ge 组分,说明 Si/Ge 量子点的富 Ge 区域内的弹性和非弹性应变弛豫是可以忽略不计的,同时,也清楚地表明了这种小尺寸的 Si/Ge 量子点内的应变仍遵从双轴应变,并且应变的释放主要由量子点和 Si 隔离层间 Si-Ge 原子互扩散决定。

参考文献:

- [1] Brunner K, SiGe nanostructures[J]. Rep. Prog. Phys., 2002, 65: 27.
- [2] De Seta M, Capellini G, Evangelisti F, et al. Intermixing-promoted scaling of Ge/Si(100) island sizes[J]. J. Appl. Phys., 2002, 92: 614.
- [3] Kwok SH, Yu PY, Tung CH, et al. Confinement and electron-phonon interactions of the E_1 exciton in self-organized Ge quantum dot[J]. Phys. Rev. B, 1999, 59: 4980.
- [4] Kolobov AV, Raman scattering from Ge nanostructures grown on Si substrates: Power and limitation[J]. J. Appl. Phys., 2000, 87: 2926.
- [5] Lannin JS, Vibrational and Raman-scattering properties of crystalline $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ alloys[J]. Phys. Rev. B, 1977, 16: 1510.
- [6] Tan PH, Bougeard D, Sabathil M, et al. accepted by the 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Nara, Japan, July 14-18, 2003.
- [7] Gironcoli SD, Phonons in Si-Ge systems: An ab initio interatomic-force-constant approach[J]. Phys. Rev. B, 1992, 46: 2412.
- [8] Denker U, Stoffel M, Schmidt OG, et al., Ge hut cluster luminescence below bulk Ge band gap[J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 82: 454.
- [9] Stoehr M, Aubel D, Juillaguet S, et al. Phonon strain-shift coefficients of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ grown on Ge(001)[J]. Phys. Rev. B, 1996, 53: 6923.
- [10] Schorer R, Abstreiter G, Gironcoli SD, et al. In-plane Raman scattering of(001)-Si/Ge superlattices: Theory and experiment[J]. Phys. Rev. B, 1994, 49: 5406.

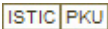
- [11] Cerdeira F , Buchenauer CJ , Pollak FH , et al. Stress - Induced Shifts of First - Order Raman Frequencies of Diamond - and Zinc - Blende - Type Semiconductors[J]. Phys. Rev. B , 1972 , 5 : 580.
- [12] Renucci MA , Renucci JB , Cardona M , in Proceedings of the 2nd International Conference on Light Scattering in Solids , Balkanski M eds. , Paris , 1971 , Flammarion , p. 326.

(上接第 288 页)

参考文献 :

- [1] 林晓春 , 向健勇 , 郭艳艳等 , 若干特殊函数在 T 矩阵求解散射场时的编程实现 [J]. 光散射学报 , 2004 , Vol. 16 , No. 2 , p153 - 158
- [2] 林晓春 , 林锡贵 . 散射场展开项中截断系数 N 取值的考虑 [J]. 光散射学报 , 2004 , Vol. 16 , No. 2 , p159 - 162
- [3] 林晓春 , 王艳 . 一种基于图象融合的红外图象增强新方法 [J]. 红外技术 , 2004 , Vol. 26 , No. 2 , p48 - 50
- [4] 过润秋 , 林晓春 . 基于模糊控制的自动回转系统 [J]. 西安电子科技大学学报 , 1999 , 26(4) : 414 - 419.
- [5] Guo Runqiu , Lin Xiaochun . Research for the automatic control system of the high precision turn tabl[J]. ICEMT2001 2001 , Vol. 15 , No. 11 , p. 117 - 120
- [6] Waterman P C . New formulation of acoustic scattering [J]. Acoust. Soc. Am. , 1969 , 45 : 1417 - 1429.
- [7] Jung Hyeun Kim , Ehrman Sheryl H , Mulholland George W , et al. Polarized light scattering by dielectric and metallic spheres on silicon wafers [J]. Appl. Opt , 2002 , 41(25) : 5405 - 5412.
- [8] Videen Gorden . Light scattering from a sphere on or near a surfac[J]. Opt. Soc. Am. , 1991 , 8 (3) : 483 - 489.
- [9] Nebeker B M , Starr G W , Hirleman E D . Evaluation of Iteration Methods Used When Modeling Scattering from Features on Surfaces Using the Discrete - Dipole Approximation [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer , 1998 , 60(3) : 493 - 499.
- [10] Stan Stokowski , Mehdi Vaez - Irvani . Wafer Inspection Technology Challenges for ULSI Manu- facturing [J]. Yield Management solutions , 1999 , 2(1) : 15 - 19.

小尺寸Si/Ge量子点内应变和组分的拉曼光谱表征

作者: [谭平恒](#), [周霞](#), [杨富华](#), [K. Brunner](#), [D. Bougeard](#), [G. Abstreiter](#)
作者单位: [谭平恒\(半导体超晶格国家重点实验室, 中科院半导体研究所, 北京, 100083; Walter Schottky Institut, Technische Universität München, D-85748, Garching, Germany\)](#), [周霞, 杨富华\(半导体超晶格国家重点实验室, 中科院半导体研究所, 北京, 100083\)](#), [K. Brunner, D. Bougeard, G. Abstreiter \(Walter Schottky Institut, Technische Universität München, D-85748, Garching, Germany\)](#)
刊名: [光散射学报](#) 
英文刊名: [CHINESE JOURNAL OF LIGHT SCATTERING](#)
年, 卷(期): 2004, 16(3)
被引用次数: 1次

参考文献(12条)

1. [Brunner K](#) [SiGe nanostructures](#) 2002
2. [De Seta M; Capellini G; Evangelisti F](#) [Intermixing-promoted scaling of Ge/Si\(100\) island sizes](#) [外文期刊] 2002
3. [Kwok SH; Yu PY; Tung CH](#) [Confinement and electron-phonon interactions of the E1 exciton in self-organized Ge quantum dots](#) [外文期刊] 1999(7)
4. [Kolobov AV](#) [Raman scattering from Ge nanostructures grown on Si substrates: Power and limitations](#) [外文期刊] 2000(6)
5. [Lannin JS](#) [Vibrational and Raman-scattering properties of crystalline Ge_{1-x}Si_x alloys](#) [外文期刊] 1977
6. [Tan PH; Bougeard D; Sabathil M](#) [accepted by the 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures](#) 2003
7. [Gironcoli SD](#) [Phonons in Si-Ge systems: An ab initio interatomic-force-constant approach](#) [外文期刊] 1992
8. [Denker U; Stoffel M; Schmidt OG](#) [Ge hut cluster luminescence below bulk Ge band gap](#) [外文期刊] 2003
9. [Stoehr M; Aabel D; Juillaguet S](#) [Phonon strain-shift coefficients of Si_{1-x}Ge_x grown on Ge\(001\)](#) [外文期刊] 1996(11)
10. [Schorer R; Abstreiter G; Gironcoli SD](#) [In-plane Raman scattering of \(001\)-Si/Ge superlattices: Theory and experiment](#) 1994
11. [Cerdeira F; Buchenauer CJ; Pollak FH](#) [Stress-Induced Shifts of First-Order Raman Frequencies of Diamond- and Zinc-Blende-Type Semiconductors](#) 1972
12. [Renucci MA; Renucci JB; Cardona M](#) [查看详情](#) 1971

本文读者也读过(10条)

1. [谭平恒](#), [罗向东](#), [葛惟昆](#), [徐仲英](#), [Zhang Y](#), [Mascarenhas A](#), [Xin H P](#), [Tu C W](#), [Tan P H](#), [Luo X D](#), [Ge W K](#), [Xu Z Y](#), [Zhang Y](#), [Mascarenhas A](#), [Xin H P](#), [Tu C W](#) [低N含量GaAsN材料的共振喇曼散射及其带边以上的光致发光光谱](#) [期刊论文] - [半导体学报](#) 2006, 27(3)
2. [谭平恒](#), [周霞](#), [杨富华](#), [BOUGEARD D](#), [SABATHIL H](#), [VOGL P](#), [ABSTREITER G](#), [Brunner K](#) [p型掺杂Si/Ge量子点的电子拉曼散射](#) [期刊论文] - [光散射学报](#) 2004, 16(1)
3. [崔继锋](#), [叶志镇](#), [吴贵斌](#), [赵炳辉](#) [高Ge成份SiGe合金弛豫及热应变的Raman光谱研究](#) [期刊论文] - [材料科学与](#)

4. [罗向东](#), [徐仲英](#), [谭平恒](#), [GE Wei-Kun](#) GaNAs/GaAs中的激子局域化和发光特性[期刊论文]-[红外与毫米波学报](#)2005, 24(3)
5. [李传波](#), [毛容伟](#), [左玉华](#), [成步文](#), [余金中](#), [王启明](#) 微腔调制常温Ge量子点光荧光特性研究[会议论文]-2004
6. [张雷](#), [彭英才](#), [马蕾](#), [徐卓](#), [王侠](#), [ZHANG Lei](#), [PENG Ying-cai](#), [MA Lei](#), [XU Zhuo](#), [WANG Xia](#) Ge纳米结构的制备技术与发光特性研究进展[期刊论文]-[河北大学学报\(自然科学版\)](#) 2008, 28(1)
7. [安龙](#), [唐艳](#), [章继东](#), [姬扬](#), [谭平恒](#), [杨富华](#), [郑厚植](#) 三势垒隧穿结构中由外加垂直磁场引入的高子带非热占据[期刊论文]-[光谱学与光谱分析](#)2003, 23(3)
8. [包志华](#), [景为平](#), [罗向东](#), [谭平恒](#), [Bao Zhi-Hua](#), [Jing Wei-Ping](#), [Luo Xiang-Dong](#), [Tan Ping-Heng](#) 显微光谱研究半绝缘GaAs带边以上E₀+ Δ 0光学性质[期刊论文]-[物理学报](#)2007, 56(7)
9. [周浩](#), [蒋最敏](#), [陆昉](#) 锗硅双层量子点的光电流特性[期刊论文]-[固体电子学研究与进展](#)2002, 22(4)
10. [陈长春](#), [余本海](#), [刘江峰](#), [曹建清](#), [朱德彰](#), [CHEN Changchun](#), [YU Benhai](#), [LIU Jiangfeng](#), [CAO Jianqing](#), [ZHU Dezhang](#) SiGe/Si(100)外延薄膜材料的应变表征研究[期刊论文]-[核技术](#)2005, 28(4)

引证文献(1条)

1. [李瑞](#), [卢景霄](#), [陈永生](#), [杨仕娥](#), [靳锐敏](#), [王海燕](#), [张宇翔](#), [郜小勇](#) Raman散射和AFM对多晶硅薄结晶状况的研究[期刊论文]-[光散射学报](#) 2005(2)

引用本文格式: [谭平恒](#), [周霞](#), [杨富华](#), [K. Brunner](#), [D. Bougeard](#), [G. Abstreiter](#) 小尺寸Si/Ge量子点内应变和组分的拉曼光谱表征[期刊论文]-[光散射学报](#) 2004(3)