Bi³⁺掺杂对YVO₄:Yb³⁺近红外发光的敏化作用

肖全兰¹ 孟建新^{1,2,*} 谢丽娟¹ 张 蕤¹⁽¹⁾暨南大学化学系, 广州 510632; ⁽²⁾暨南大学纳米化学研究所, 广州 510632)

摘要: 用高温固相法合成了Yb³⁺、Bi³⁺共掺的YVO₄, 研究了Bi³⁺的掺入对YVO₄:Yb³⁺发光光谱的影响和近红外发光的敏化作用. X射线衍射图谱研究表明: 掺入Yb³⁺、Bi³⁺之后, 基质YVO₄的晶格结构没有发生明显变化. Bi³⁺的掺入不仅显著增强了样品中Yb³⁺的特征远红外发光强度, 还使YVO₄:Yb³⁺激发光谱的范围红移, 当Bi³⁺掺入的摩尔分数从0增加到0.05时, 样品的最强激发峰位置从335 nm红移至352 nm, 激发光谱范围由300–360 nm扩宽至300–430 nm. 优化的Bi³⁺掺入量为0.03. 初步讨论了VO₄³⁻, Bi³⁺和Yb³⁺间的能量传递机理. 结果表明Bi³⁺的共掺使YVO₄:Yb³⁺样品对长波紫外光的响应性能大大改善, 作为一种基于量子剪裁的光谱转换材料, 可以更好地匹配太阳光的能量谱, 有助于提高硅太阳能电池的光电转换效率.

关键词: 近红外发光; 固相法; 能量下转换; YVO₄:Yb³⁺, Bi³⁺

中图分类号: O644

Near-Infrared Luminescence Enhancement by Co-Doped Bi³⁺ in YVO₄:Yb³⁺

XIAO Quan-Lan¹ MENG Jian-Xin^{1,2,*} XIE Li-Juan¹ ZHANG Rui¹⁽¹⁾Department of Chemistry, Jinan University, Guangzhou 510632, P. R. China;⁽²⁾Institute of Nanochemistry, Jinan University, Guangzhou 510632, P. R. China)

Abstract: The near-infrared (NIR) luminescence phosphor Yb³⁺, Bi³⁺ co-doped YVO₄ was prepared by a conventional solid state method and the sensitization of Yb³⁺ near-infrared luminescence by Bi³⁺ was investigated. By co-doping with Bi³⁺ from 0 to 0.05 the characteristic NIR luminescence of Yb³⁺ in the YVO₄ matrix was greatly enhanced and the strongest site of the excitation wavelength red-shifted from 335 to 352 nm while the wavelength range of the excitation spectrum broadened from 300–360 to 300–430 nm. The optimized Bi³⁺ content is 0.03. The possible energy transfer mechanism among VO₄³⁻, Bi³⁺, and Yb³⁺ was discussed. We conclude that the NIR luminescence of YVO₄:Yb³⁺ can be remarkably improved by co-doping with Bi³⁺ and its absorbance matches better with the solar energy spectrum. YVO₄:Yb³⁺, Bi³⁺ is a promising spectral converter for silicon solar cells and it is expected to improve the photoelectric conversion efficiency.

Key Words: Near-infrared luminescence; Solid state reaction; Energy down-conversion; YVO₄:Yb³⁺, Bi³⁺

1 引言

量子剪裁(quantum-cutting, QC), 又称为能量下

转换(down-conversion), 是借助于稀土离子特殊的电子能级结构, 一些稀土离子掺杂的材料可以吸收

Received: June 15, 2011; Revised: July 4, 2011; Published on Web: July 19, 2011.

* Corresponding author. Email: tmjx@jnu.edu.cn; Tel: +86-20-85220223.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (30670523) and Central University by Basic Scientific Research Business Expenses, China.

国家自然科学基金(30670523)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

© Editorial office of Acta Physico-Chimica Sinica

一个短波长的光子后,通过多级或协同发光,转换为两个或以上长波长的光子,得到高于100%的转换效率.稀土离子掺杂的真空紫外(VUV)激发的QC荧光粉由于可以很好地应用于PDP(Plasma Display Panel)显示,早已受到极大的关注.¹⁻³近年来,由于注意到具有QC效应的近红外(NIR)发光材料可对太阳光谱进行调制,降低硅太阳能电池热化效应,从而提高太阳能电池的效率,⁴⁻⁶因此具有NIR QC效应的发光材料备受关注.⁷⁻¹⁰早在2005年,Vergeer等¹¹在磷酸盐粉体中共掺 $\text{Tb}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 离子对,首次实现了近红外光的QC:用蓝光激发 Tb^{3+} 后,通过 Tb^{3+} 向 Yb^{3+} 的QC能量传递,激发 Yb^{3+} 离子,并发射980 nm近红外,理论能量传递效率接近200%.随后,掺 Yb^{3+} 的QC荧光粉成为研究热点,如 $\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO-LaF}_3\text{:RE}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ ($\text{RE}=\text{Pr, Tb, Tm}$),¹² $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺氟硅酸盐,¹³ $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Yb}^{3+},\text{Bi}^{3+}$,¹⁴ 这些研究更加证实了QC在提高太阳能电池效率方面的潜在应用价值.

钒酸钇(YVO_4)晶体是一种很有应用前景的晶体材料,由于它掺杂稀土离子后可以有效地发射不同波长的光,且在基质与稀土离子之间能有效地发生共振能量传递.¹⁵⁻¹⁷因此,受到人们的广泛关注,如 $\text{YVO}_4\text{:Eu}^{3+}$,¹⁸ $\text{YVO}_4\text{:Nd}^{3+}$.¹⁹最近,Wei等²⁰报道了 $\text{YVO}_4\text{:Yb}^{3+}$ 中可通过 VO_4^{3-} 的电荷转移跃迁吸收紫外光后,再通过QC过程得到转化效率高达185.7%的近红外发光材料.但由于 VO_4^{3-} 基团的紫外吸收波段主要在250–350 nm,而太阳光谱中不能被硅太阳能电池利用的波段主要在300–400 nm的波段,因此二者不能很好匹配,限制了这种材料的进一步应用.

在发光材料中 Bi^{3+} 是一种很好的激活离子和敏化离子,如: $\text{LnVO}_4\text{:Eu}^{3+},\text{Bi}^{3+}$,²¹ $\text{GdAlO}_3\text{:Tb}^{3+},\text{Bi}^{3+}$,²² $\text{Li(W,Mo)}_2\text{O}_8\text{:Eu}^{3+},\text{Bi}^{3+}$.²³对 $\text{Yb}^{3+}/\text{Bi}^{3+}$ 共掺材料的研究也有很多,如: $\text{Ge}_3\text{O}_{12}\text{:Yb}^{3+},\text{Bi}^{3+}$,²⁴ $\text{Na(WO}_4)_2\text{:Yb}^{3+},\text{Bi}^{3+}$,²⁵ $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Yb}^{3+},\text{Bi}^{3+}$.¹⁴我们发现: Bi^{3+} 共掺 $\text{YVO}_4\text{:Yb}^{3+}$ 后,不仅使该材料的近红外发光强度大大增强,同时激发光谱发生明显的红移,可以与太阳光的能量谱更好地匹配,可望成为一种有效的太阳光谱转换材料,进一步提高硅太阳能电池光电转换效率.

2 实验

2.1 样品的制备

将 Y_2O_3 、 NH_4VO_3 、 Yb_2O_3 、 Bi_2O_3 按适宜的化学计量比称量,在玛瑙研钵中磨细混匀后装入刚玉坩埚,在空气中于1100 °C焙烧1 h.所得样品自然冷

却,研磨,即得到样品荧光粉体.所用试剂除 NH_4VO_3 为分析纯外,其它试剂的纯度均为99.99%.

2.2 粉体结构及光学性能测试

样品的物相分析采用日本Rigaku/Dmax-rB型Cu靶 K_α 辐射X射线衍射仪(36 kV, 20 mA, $\lambda=0.15406$ nm,扫描速率为 $8^\circ\cdot\text{min}^{-1}$);样品近红外发光的检测使用AVANTES-2048TEC光纤光谱仪;测试激发光谱和发射光谱时,光源均为150 W 氙灯.测试荧光寿命时以337 nm N_2 脉冲激光(Stanford Research Systems, model NL100)作为激发光源,样品发光信号经透镜聚焦,单色器分光后由光电倍增管(HAMAMATSU 1P28型)探测,用高速存储示波器(Agilent, Model DSO7054A)记录其发光衰减曲线,对发光衰减曲线进行单指数拟合得到发光寿命.所有测试均在室温下进行.

3 结果与讨论

3.1 样品的XRD分析

图1是所得 $\text{YVO}_4\text{:Yb}^{3+},\text{Bi}^{3+}$ 荧光粉的X射线衍射图谱,其XRD图谱均与 YVO_4 的标准图谱JCPDS No. 17-0341相吻合,表明所制得的样品为 YVO_4 纯相,呈四方晶型.材料中少量 Yb^{3+} 和 Bi^{3+} 的掺入只是取代了基质中 Y^{3+} 的晶格位置,并没有改变基质的晶格结构.

3.2 Bi^{3+} 共掺对 $\text{YVO}_4\text{:Yb}^{3+}$ 近红外发光的影响

Wei等²⁰报道了 $\text{YVO}_4\text{:Yb}^{3+}$ 中可通过 VO_4^{3-} 的电荷转移跃迁吸收250–350 nm的紫外光,再通过 $\text{VO}_4^{3-}\rightarrow\text{Yb}^{3+}$ 的QC过程发出 Yb^{3+} 的特征近红外发射,QC过程的转换效率高达185.7%.但这种QC近红外发光材料并不能很好地用于硅太阳能电池光谱转换材料.这是由于太阳光谱中不能被硅太阳能电池

图1 $\text{YVO}_4\text{:Yb}^{3+},\text{Bi}^{3+}$ 的XRD图

Fig.1 XRD patterns of $\text{YVO}_4\text{:Yb}^{3+},\text{Bi}^{3+}$

利用的波段主要在 300–400 nm, 要求合适的光谱转换材料能够很好地吸收这一波段的太阳光, 而 YVO₄:Yb³⁺中 VO₄³⁻基团主要吸收波长低于 350 nm 的紫外光, 因此二者不能很好匹配. 我们发现, Bi³⁺的共掺可以很好地解决这一问题. 图 2 为不同 Bi³⁺掺杂量的系列 YVO₄:0.04Yb³⁺, yBi³⁺的激发和发射光谱. 可以看到, Bi³⁺的掺入, 使 Yb³⁺在 980 nm (归属于 Yb³⁺的 ²F_{5/2}→²F_{7/2} 跃迁) 的特征发射峰有明显的增强. 在 980 nm 监测下的激发光谱随 Bi³⁺掺杂量的增加逐渐红移, 其激发光谱的波峰位置从 335 nm 红移至 352 nm, 激发光谱范围从 300–360 nm 扩宽至 300–430 nm, 激发光谱的强度也有明显的提高. 表明 Bi³⁺的掺入对 Yb³⁺的近红外发光有较好的敏化作用, 激发光谱移动后可以很好地匹配太阳光谱中不能被硅太阳能电池利用的 300–400 nm 的波段, 因此非常有利于提高硅太阳能电池的光电转换效率.

对不同 Bi³⁺和 Yb³⁺含量样品的近红外发光的研究表明, YVO₄:Yb³⁺, Bi³⁺中 Yb³⁺和 Bi³⁺的最佳掺杂量分别约为 0.04 和 0.03. 其中 Yb³⁺的最佳掺杂量与 Wei 等²⁰报道的 YVO₄:Yb³⁺中 Yb³⁺的最佳掺杂浓度相同, 表明 Bi³⁺的掺入对 Yb³⁺离子激发态的弛豫几乎不影响.

3.3 YVO₄:Bi³⁺的发光性能

为了弄清 Bi³⁺共掺对 YVO₄:Yb³⁺近红外发光敏化作用的原因, 进一步研究了 Bi³⁺掺杂和 Yb³⁺掺杂对样品可见区发光的影响, 图 3 是系列 YVO₄:yBi³⁺样品的可见区发光的激发和发射光谱. 从激发和发射光谱可以看出, 未掺入 Bi³⁺时, 样品的最大激发和发射波长分别位于 335 和 482 nm, 均归属于 VO₄³⁻的电荷转移跃迁;²⁰ 当掺入 Bi³⁺后, 样品的激发和发射

图2 YVO₄:0.04Yb³⁺, yBi³⁺的激发和发射光谱图

Fig.2 Excitation and emission spectra of the YVO₄:0.04Yb³⁺, yBi³⁺ phosphors

光谱的强度和形状均有明显的变化, 随 Bi³⁺掺入量的提高, 在 350 nm 附近出现了归属于 Bi³⁺的 ¹S₀→³P₁ 跃迁, 在 560 nm 处出现了归属于 Bi³⁺的 ³P₁→¹S₀ 跃迁的强发射峰,¹⁰ 由于其强度较高, 使 482 nm 处归属于 VO₄³⁻的发射峰表现为一弱的肩峰. 从图中监测各样品最大发射波长所得激发光谱还可以看出, 其最强激发峰的位置从 335 nm 红移至 352 nm, 同时激发波长的范围由 310–360 nm 扩宽至 300–430 nm. 激发光谱的这种变化与监测 Yb³⁺在 980 nm 处的近红外发射所得激发光谱的情况几乎一样, 进一步表明共掺 Bi³⁺后 Yb³⁺的近红外发光增强来源于 Bi³⁺的敏化作用. 此外, 从图 4 所示的不同 Yb³⁺含量时样品可见光区的发射光谱可知, 随 Yb³⁺含量的提高, YVO₄:xYb³⁺, 0.03Bi³⁺的可见发光明显降低, 同时我们注意到, 随 Yb³⁺的掺入 482 和 560 nm 处的发光以几乎同等的程度降低, 表明 Bi³⁺和 VO₄³⁻对能量传递过程有相近的作用.

3.4 荧光寿命分析

对系列 YVO₄:yBi³⁺样品在 482 和 560 nm 的荧光寿命测试的结果表明, 未掺入 Bi³⁺时, VO₄³⁻在 482 nm

图3 YVO₄:yBi³⁺的激发和发射光谱图

Fig.3 Excitation and emission spectra of YVO₄:yBi³⁺

图4 YVO₄:xYb³⁺, 0.03Bi³⁺的可见发射光谱图

Fig.4 Visible emission spectra of YVO₄:xYb³⁺, 0.03Bi³⁺

图5 Yb^{3+} 含量变化对 $\text{YVO}_4:\text{xYb}^{3+}, 0.03\text{Bi}^{3+}$ 荧光寿命的影响
Fig.5 Effects of Yb^{3+} content on lifetimes of $\text{YVO}_4:\text{xYb}^{3+}, 0.03\text{Bi}^{3+}$ samples

处的荧光寿命为 $5.17 \mu\text{s}$, 掺入 Bi^{3+} 后, 482 nm 处的荧光寿命逐渐降低到 $\text{YVO}_4:0.05\text{Bi}^{3+}$ 中的 $3.77 \mu\text{s}$, 表明 Bi^{3+} 的掺入为 VO_4^{3-} 激发态的弛豫提供了新的通道. 同时, 我们注意到: 不同 Bi^{3+} 掺杂量的各个样品, 其 482 和 560 nm 两个波长位置的发光寿命都几乎相同, 表明他们发射态能级能量相近, 且可能可以快速相互转化.

图5为 $\text{YVO}_4:\text{xYb}^{3+}, 0.03\text{Bi}^{3+}$ 体系在 Bi^{3+} 发射波长 560 nm 的荧光衰减曲线. 可以看出, 随着 Yb^{3+} 含量的增加, Bi^{3+} 的荧光衰变速度逐渐加快. 对荧光衰减曲线进行单指数拟合后得到荧光寿命, 通过公式 $\eta_{\text{CET}} = 1 - k_{\text{D}}/k_{\text{AD}}$ (k_{D} 为不掺 Yb^{3+} 时样品的衰减速率; k_{AD} 为掺 Yb^{3+} 时样品的衰减速率), $\eta_{\text{QE}} = \eta_{\text{Bi-O/V-O}}(1 - \eta_{\text{CET}}) + 2\eta_{\text{Yb}}\eta_{\text{CET}}$,¹⁴ 可算出电荷转移激发态 $\rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 之间的能量传递效率 η_{QE} , 结果如图5中插图所示. 可以看出, 随着 Yb^{3+} 的掺入, 能量传递效率逐渐升高, 当 Yb^{3+} 掺杂量为 0.15 时, 能量传递效率 η_{QE} 为 171.0% , 与 Wei 等²⁰ 报道的 $\text{YVO}_4:0.16 \text{ Yb}^{3+}$ 的能量传递效率 185.7% 相近, 说明 Bi^{3+} 的掺入并没有明显降低能量传递的效率.

3.5 QC 能量传递过程分析

图6为对应于 $\text{YVO}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$ 中能量弛豫过程的简化能级示意图及可能的能量传递机理. Wei 等²⁰ 已经报道, 由于 Yb^{3+} 在紫外可见区没有其他能级跃迁, 同时, VO_4^{3-} 的电荷转移跃迁发射过程的能量差约等于 $\text{Yb}^{3+}: {}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ 跃迁的两倍, 因此, 可以发生这一电荷转移跃迁和 $\text{Yb}^{3+}: {}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ 跃迁之间的 QC 过程. 该体系中 Bi^{3+} 离子共掺后, O 的 $2p$ 满带至 V 的 $3d$ 空导带(波长小于 350 nm 的波段)跃迁与掺杂 Bi^{3+}

图6 $\text{VO}_4^{3-}, \text{Bi}^{3+}$ 和 Yb^{3+} 的简化能级示意图及可能的能量传递机理

Fig.6 Scheme of energy levels of $\text{VO}_4^{3-}, \text{Bi}^{3+}$, and Yb^{3+} , and possible energy transfer mechanisms

离子的 ${}^1S_0 \rightarrow {}^3P_1$ 的跃迁具有相近的激发态能级高度, 并可以快速地互相转化, 因此, 并不阻碍 VO_4^{3-} 的发射和 $\text{Yb}^{3+}: {}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ 跃迁之间的 QC 过程. Bi^{3+} 的掺入不仅使得该体系激发光谱发生明显的红移, 可以更好地满足太阳光谱转换材料的要求, 同时也明显地增强了样品的近红外发光强度. 虽然存在 Bi^{3+} 自身发射导致的额外的能量弛豫, 但在较高的 Yb^{3+} 离子浓度情况下, QC 过程的效率显然更加高, 并 Yb^{3+} 离子产生更强的近红外发射.

4 结论

采用高温固相法制备了 $\text{YVO}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$ 近红外发光材料, 发现 Bi^{3+} 的掺入使材料的激发光谱红移且发光强度明显增大. 对其荧光光谱和荧光寿命的研究表明, 体系中存在 $\text{VO}_4^{3-}, \text{Bi}^{3+}$ 和 Yb^{3+} 三者之间的能量传递, 这一能量传递可能是通过能量相近且可互相快速转化的 V-O 或 $\text{Bi}^{3+}-\text{O}^{2-}$ 激发态能级与 Yb^{3+} 离子之间的量子剪裁过程进行的. Bi^{3+} 的掺入不仅增强 $\text{YVO}_4:\text{Yb}^{3+}$ 的近红外发射, 而且可以使其激发光谱与太阳光能量谱实现更好的匹配, 从而可以更好地用于硅太阳能电池的光谱转换材料, 有助于提高太阳能电池光电转换效率.

References

- (1) Zhang, Q. Y.; Huang, X. Y. *Prog. Mater. Sci.* **2011**, *55*, 353.
- (2) Huang, X. Y.; Yu, D. C.; Zhang, Q. Y. *J. Appl. Phys.* **2009**, *106*, 113521.
- (3) Chen, J. D.; Guo, H.; Li, Z. Q.; Zhang, H.; Zhuang, Y. X. *Optical Materials* **2010**, *32*, 998.
- (4) Dong, N.; Xu, M.; Zhang, W. P.; Yin, M.; Tao, Y.; Makhov, V. N.; Khaiduhov, N. M.; Krupa, J. C. *Nuclear Techniques* **2004**, *7*, 909. [董宁, 徐美, 张慰萍, 尹民, 陶冶, Makhov, V. N., Khaiduhov, N. M., Krupa, J. C. 核技术, **2004**, *7*, 909.]

- (5) Richards, B. S. *Solar Energy Material & Solar Cells* **2006**, *90*, 1189.
- (6) Richards, B. S. *Solar Energy Material & Solar Cells* **2006**, *90*, 2329.
- (7) Fukuda, T.; Kato, S.; Kin, E.; Okaniwa, K.; Morikawa, H.; Honda, Z.; Kamata, N. *Optical Materials* **2009**, *32*, 22.
- (8) Ye, S.; Yu, D. C.; Huang, X. Y.; Yang, Z. M.; Zhang, Q. Y. *J. Appl. Phys.* **2010**, *108*, 083528.
- (9) Lin, H.; Zhou, S. M.; Teng, H.; Li, Y. K.; Li, W. J.; Hou, X. R.; Jia, T. T. *J. Appl. Phys.* **2010**, *107*, 043107.
- (10) Torre, J. D.; Bremond, G.; Lemiti, M.; Guillot, G.; Mur, P.; Buffet, N. *Thin Solid Films* **2006**, *511*, 163.
- (11) Vergeer, P.; Vlugt, T. J. H.; Kox, M. H. F.; Hertog, M. I. D.; Eerden, J. P. J. M.; Meijerink, A. *Phys. Rev. B* **2005**, *71*, 014119.
- (12) Lakshminarayana, G.; Qiu, J. R. *Journal of Alloys and Compounds* **2009**, *481*, 582.
- (13) Luo, S. Q.; Zhao, L. J.; Hu, N.; Zhang, M.; Zhang, P.; Wang, Y. Z.; Yu, H. *Chin. Phys. Lett.* **2011**, *28*, 207.
- (14) Huang, X. Y.; Zhang, Q. Y. *J. Appl. Phys.* **2010**, *107*, 063505.
- (15) Li, L. X.; Xu, L.; Zhang, H. J.; Xia, H. R.; Huang, X.; Liu, Q. *Spectroscopy and Spectral Analysis* **2003**, *23*, 1119. [李丽霞, 徐 丽, 张怀金, 夏海瑞, 黄 信, 刘 枢. 光谱学与光谱分析, **2003**, *23*, 1119.]
- (16) Zhuang, F. J.; Zheng, Y. Q.; Huang, C. H.; Wei, Y.; Zhu, H. Y.; Zhang, G. *Optics Communications* **2010**, *283*, 3324.
- (17) Singh, A. J.; Sharma, S. K.; Mukhopadhyay, P. K.; Oak, S. M. *Pramana - J. Phys.* **2010**, *75*, 929.
- (18) Shin, J. H.; Choi, S. W.; Hong, S. H.; Kwon, S. J.; Seo, S. Y.; Kim, H. S.; Song, Y. H.; Yoon, D. H. *Journal of Alloys and Compounds* **2011**, *509*, 4331.
- (19) Huang, H. T.; He, J. L.; Wang, Y. *Appl. Phys. B* **2011**, *102*, 873.
- (20) Wei, X. T.; Huang, S.; Chen, Y. H.; Guo, C. X.; Yin, M.; Xu, W. *J. Appl. Phys.* **2010**, *107*, 103107.
- (21) Park, W. J.; Jung, M. K.; Im, S. J.; Yoon, D. H. *Colloids and Surfaces A* **2008**, *314*, 373.
- (22) Park, J. Y.; Jung, H. C.; Raju, G. S. R.; Moon, B. K.; Jeong, J. H.; Son, S. M.; Kim, J. H. *Materials Research Bulletin* **2010**, *45*, 572.
- (23) He, X. H.; Guan, M. Y.; Sun, J. H.; Lian, N.; Shang, T. M. *J. Mater. Sci.* **2010**, *45*, 118.
- (24) Dong, H. N.; Wang, J.; Shuai, X.; Wu, S. Y. *Spectrochimica Acta Part A* **2008**, *70*, 7.
- (25) Kerek, A.; Boudelloua, A.; Lebbou, K.; Brenier, A.; Boulon, G. *Physics Procedia* **2009**, *2*, 497.