

可控高速旋转的纳米线和纳米线微型电动机*

范冬蕾^{1,2} 朱青² 罗伯特·卡玛拉塔¹ 钱嘉陵^{2,†}

(1 材料科学与工程系 约翰·霍普金斯大学 巴尔地摩 马里兰州 21218 美国)

(2 物理与天文学系 约翰·霍普金斯大学 巴尔地摩 马里兰州 21218 美国)

摘要 文章报道了一种通过在微型电极上加交流电场,实现有控制地高速度转动纳米线的通用方法. 纳米线的转动可以被瞬时启动或瞬时停止,转动速度(每分钟至少可达 1800 rpm),方向和总转动角度都可被精确控制. 文章作者推导出了流体阻力在不同长度纳米线上施加的转矩,还用一根转动的纳米线作为微型电动机,推动灰尘颗粒做圆周运动. 这种方法可以被用来转动磁性的或者非磁性的纳米线,甚至碳纳米管. 这和微流机械,微搅动机,以及 MEMS 的关系显而易见.

关键词 纳米线,微型电机系统,可控制高速转动,交流电场,纳米颗粒

Controllable high speed rotation of nanowires and micromotors

FAN Dong-Lei^{1,2} ZHU Qing (Frank)² Robert Cammarata¹ CHIEN Chia-Ling^{2,†}

(1 Department of Materials Science and Engineering, Johns Hopkins University, Baltimore, MD 21218, USA)

(2 Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University, Baltimore, MD 21218, USA)

Abstract We report a versatile method for executing controllable high-speed rotation of nanowires by an AC electric field applied to strategically designed multiple microelectrodes. The rotation of the nanowires can be instantly switched on or off with precisely controlled rotation speed (to at least 1800 rpm), definite chirality, and total angle of rotation. We have determined the viscous torque due to the fluidic drag force on nanowires of different lengths at extremely low Reynolds numbers on the level of 10^{-5} , which is not theoretically well known. We have also demonstrated a micromotor using a rotating bent nanowire driving a dust particle into circular motion. This method has been used to rotate magnetic and nonmagnetic nanowires as well as multi-wall carbon nanotubes. The relevance to microfluidic devices, microstirrers, and micro-electromechanical systems^[8] is apparent.

Keywords micro-electromechanical systems (MEMS), controllable high-speed rotation, AC electric fields, nano-entities

在纳米科学和纳米技术的广泛研究中,控制纳米颗粒的运动常常是非常需要却是难以实现的. 控制尺寸小于 $10\ \mu\text{m}$ 颗粒的运动,有几种难以克服的障碍. 为了避免颗粒因为范德瓦尔斯力而吸附在器壁表面,纳米颗粒通常被悬浮在合适的溶液中. 然而,纳米颗粒在溶液中具有极低的雷诺数(定义为

$Re = \frac{D_p v \rho}{\eta}$ 其中 D_p , v , ρ 和 η 分别是颗粒大小,相对速度,溶液密度和粘滞系数),在这个范围里,颗粒

的运动完全被粘滞力所限制^[1-3]. 对于一根悬浮在去离子水里,长度为 $10\ \mu\text{m}$,直径为 $0.3\ \mu\text{m}$ 的纳米线,雷诺数只有大约 10^{-5} . 在这样小的雷诺数范围里,如果没有其他外加作用力,粘滞力本身足以让一根以 $100\ \mu\text{m}/\text{s}$ 运动的纳米线,在不到 $10^{-6}\ \text{s}$ 的时间,停止在 $1\ \text{\AA}$ 的距离内. 因此,为了使纳米线运动,

* USA NSF 基金 (No. DMR 0403849) 资助项目

2005-08-31 收到

† 通讯联系人. Email: xlc@pha.jhu.edu

需要巨大的外加作用力来克服粘滞力的影响. 也因为这个原因, 在受到稳恒的外加作用力时, 纳米线没有明显的加速过程, 而是几乎瞬时达到匀速运动.

因此实现控制纳米尺寸物体的旋转, 尤其高速旋转具有很强的挑战性. 不仅如此, 人们对于在小雷诺数下粘滞阻力造成的转矩尚没有清楚的研究. 旋转磁场被用来转动磁性纳米线, 比如 Ni, 虽然转速很低^[4,5], 但利用旋转的偏振激光和复杂精细的设备制成的光学镊子可以用来转动小颗粒, 可是通常每次只能旋转一个^[6].

不同于以上这些方法, 由微电极所提供的电场不仅可在微米尺度提供可变的作用力来推动纳米颗粒的运动, 而且更重要的是这个方法不需要运动的部件. 我们最近报道了悬浮在液体中的纳米线^[7]在交流电场驱动下, 克服低雷诺数限制, 进行高速直线运动. 我们计算出由交流电场造成的作用力及其与电压和频率的关系. 在这篇报道中, 我们将描述一种通过在多个微型电极上加交流电场, 实现有控制的高速度地转动纳米线的通用方法. 纳米线可以被瞬时转动或停止, 转动速度(至少可达 1800rpm)、方向和总转动角度都可被精确控制. 通过这个方法, 我们也推导出了流体阻力在相同直径但不同长度的纳米线上施加的转矩. 我们用这个方法成功实现了转动金属纳米线(包括磁性的与非磁性的)和非金属性的多壁纳米碳管(MWCNT). 我们还以一根弯折的金纳米线作为转子, 演示了在交流电场中纳米线微型电动机的转动. 这种微型电动机对微流体系统或微机械系统, 比如微电机系统(MEMS)的研究, 具有重要意义^[8,9].

在这篇报道中, 直径为 300 nm, 长度为 2—30 μm 的金(Au)、铂(Pt)和镍(Ni)纳米线, 是通过在纳米多孔铝模板中电镀沉积而成^[7,10]. 用 4 M 的 NaOH 溶液将多孔铝模板溶解后, 依次在水和乙醇中超声离心两次, 纳米线最后被悬浮在只有 2.4 $\mu\text{Siemens/cm}$ 微弱导电率的去离子水中. 用来转动纳米线的微型金电极由聚焦激光在镀了金膜的石英衬底上直接“写”成. 最后将 2—4 μl 的纳米线悬浊液滴在金电极上面, 纳米线的转动就是在这样的装置下实现的[如图 1(a)所示].

电极由 4 个两两相对的子电极组成, 相对的电极距离为 150 或 320 μm . 如图 1(a)所示, 4 个具有同振幅和同频率, 但相位依次相差 90°的交流电压, 加在 4 个电极上. 这样的组合在电极中心形成了一个转动的电场, 使所有悬浮在中间的纳米线同时转

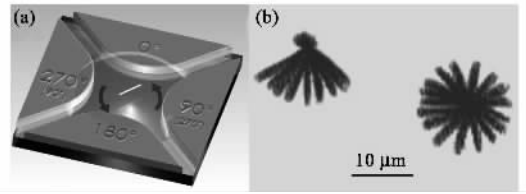


图 1 (a) 悬浮在去离子水中的纳米线在 4 个微电极中被转动的示意图, 4 个等电压、相位依次相差 90°的交流电势, 顺序加在 4 个微电极上; (b) 自由转动(右下)和一端固定(左上)的纳米线, 在 2.5 V, 80 kHz 时, 每隔 1/30s 的重叠照片

动. 安装在显微镜上的 CCD 摄像机以 30 f/s 记录, 然后用我们自行开发的软件从录像里测量出纳米线的转动角速度(ω).

大多数实验是用长度为 15 μm 的金纳米线在间隔为 150 μm 的微电极中完成的. 自由悬浮和一端由硫化学键固定在石英衬底上的纳米线^[11,12]都可以被转动. 在相同的交流电压和频率下, 自由悬浮的纳米线总是比一端固定在石英衬底上的纳米线转动得更快, 如图 1(b)所示的, 在 2.5 V 和 80 kHz 下, 相隔 1/30s 拍摄的快照重叠图.

纳米线的转动角速度(ω)同时依赖于所加交流电的振幅和频率. 转速随电压值的平方(V^2)增大. 自由悬浮的纳米线, 在 5 kHz 和 80 kHz 下, 转速对电压的依赖系数分别为 4.5 rpm/ V^2 和 18.1 rpm/ V^2 . 对于一端固定的纳米线, 在 80 kHz 下, 依赖系数为 6.3 rpm/ V^2 . 这一转速随电压的平方关系, 对实现纳米线的高速旋转特别有效. 在 80 kHz, 10V 下, 我们已经实现了以 1803 rpm 转动的自由纳米线, 和以 445 rpm 转动的一端固定的纳米线[图 2(a)]. 事实上, 所能达到的最高转速并不只限于 1800 rpm, 但当纳米线转速超过这个值时, 就超过了 30f/s 的 CCD 录像机的拍摄速度. 转动角速度(ω)还受所加交流电的频率的影响, 如图 2(b)中所示, 在恒定电压下(例如 2.5 V 和 5V), 自由纳米线的转速从 5kHz 到 50kHz 快速上升, 从 50kHz 到 300kHz 持平并略微下降.

控制纳米线的转动方向是另外一个重要的方面. 因为纳米线的转动是由具有相位差的 4 个交流电压造成的, 所以纳米线转动的方向由它们相位差的值决定. 图 1(a)中用箭头指示出, 转动方向始终与电场转动方向一致, 但与交流电相位移动的方向相反. 当相位移动是 -90° (或 90°) 时, 纳米线就顺时针(或逆时针)旋转. 这个规律在很宽的频率范围

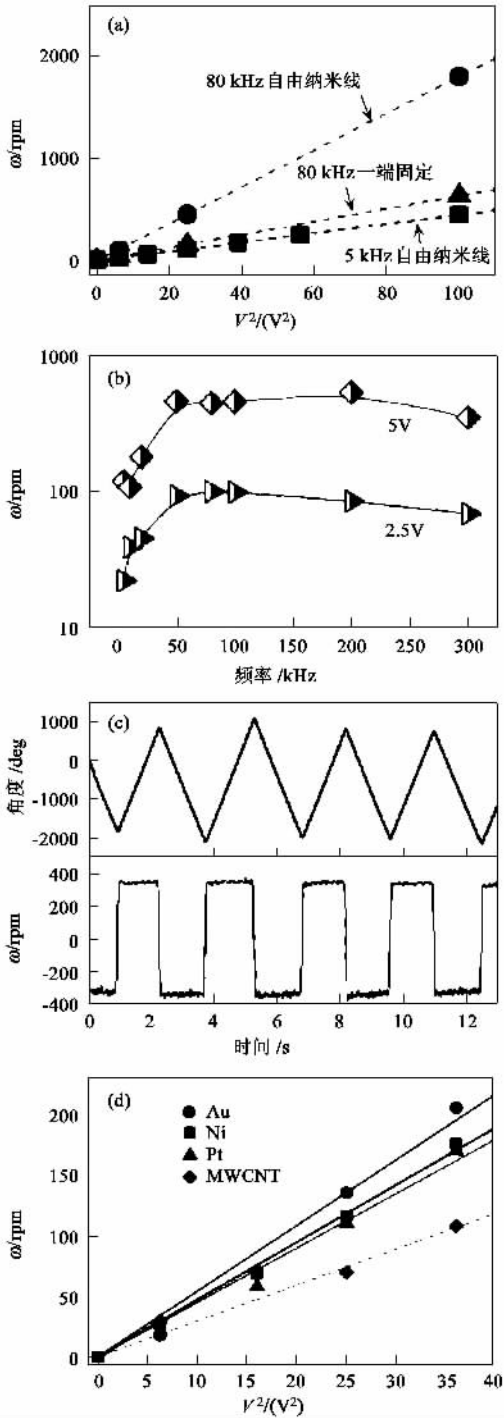


图2 (a)自由金纳米线在5kHz和80kHz下,以及一端固定的金纳米线在80kHz下的转速随 V^2 变化的关系 (b)自由金纳米线在2.5V和5V下,转速的半对数图随交流电场频率变化的关系 (c)金纳米线在5kHz和10V,方向反复翻转的电场下,转动角度和转动速度随时间变化的关系 (d) Au, Ni, Pt, 和多壁纳米碳管(MWCNT)的转动角速度(ω)随 V^2 变化的关系

内(5—300Hz)都得到了验证。

为了进一步阐明对纳米线转动方向的操控能力,我们反复设置交流电相位差为 90° 或 -90° 。纳米线的转动对相位翻转即时响应,并瞬时达到稳定转速,图2(c)是纳米线的总转动角度和实时转速的时间序列图,在我们所观测的 $1/30$ s内没有明显的加速或减速过程。而且转动随着电场的开启(关闭)而立刻启动(停止)。这种特殊的即时反应是因为悬浮在去离子水中的纳米线处于 10^{-5} 这样极小雷诺数的范围。这些结果表明,我们可以用交流电压瞬时启动或停止纳米线的转动,精确控制转动速度、方向以及总转动角度。

纳米线的转动是由转动的交流电场和纳米线上感应导致的电偶极子之间的互相作用造成的^[13]。金属导体中的载流子被外电场移动,形成一定的电荷

分布,由此而产生的电偶极矩为 $p = \hat{l} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} x \rho(x) dx$,

其中 p 是感应电偶极矩, \hat{l} 是沿纳米线方向的单位矢量,是纳米线中感应电荷的分布密度,积分区间

是纳米线的长度范围 $[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$ 。 p 的大小依赖于具

体的电荷分布,而这由材料性质、所加电场,特别是材料的形状所决定。金属球的感应电偶极矩用经典的理论可以很容易地计算出来。纳米线可以被近似成一个具有很大长轴的椭球,与圆球相比,在同样条件下,长形椭球的感应电偶极矩大大增强。我们所用的金纳米线,具有极大的长宽比,其感应电偶极矩比相应球体增大了380倍,因此大大增加了转动纳米线的效率^[7]。纳米线所受的力矩表达式是 $T_e =$

$\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} x \rho(x) [\hat{l} \times E(x)] dx$,其中 $E(x)$ 是所加电场。在

本实验中,我们只研究那些在电极中心区域小范围内转动的纳米线。模拟计算显示电极中心($20 \times 20 \mu\text{m}$)的小区域内,电场强度变化小于5%^[14];因此电场强度 $E(x)$ 可以被近似为常数。转矩 T_e 可以被简化为 $p \times E$ 。因此转矩正比于 E^2 。对一根长为 L ,半径为 a ($L \gg a$),悬浮在介电常数为 ϵ_m 的溶液中的导电金属纳米线,转矩大小为^[15]

$$T_e \approx \frac{\pi L^3}{12} \frac{\epsilon_m}{\ln \frac{L}{a}} E^2, \quad (1)$$

这里转矩正比于 E^2 的关系解释了实验中观察到的纳米线转速正比于 V^2 的现象。

纳米线稳恒转动角速度(ω)是由 $T_e = T_\eta$ 决定

的,其中 T_{η} 是流体粘滞力导致的力矩. 因为雷诺数极小,在每一交流电场下,纳米线事实上是瞬时达到稳恒转动角速度的. 并且纳米线的转动可以被瞬时开启或停止. 同样因为粘滞力极大的原因,纳米线不能与外加转动电场同步,而总是与电场的转动有一滞后. 实际的转动方向取决于感应电荷在纳米线本身和其所处溶液的弛豫时间. 当电荷在纳米线中的弛豫时间小于溶液时,比如金纳米线在去离子水中,纳米线的转动方向就会和电场转向一致,这和我们 在 5—300 kHz 的频率范围内所观察到的一致.

对一半径为 R 的球体,粘滞力矩 T_{η} 的计算公式为 $\eta\omega(8\pi R^3)$, 其中 η 是粘滞系数 ω 转动速度,而最后一项是球体的形状系数. 对其他形状的小颗粒,包括纳米线,形状系数理论上尚没有严格的解析公式. 对于纳米线,我们把 T_{η} 的表达式写为 $\eta\omega f(L)$, 其中 $f(L)$ 是只和纳米线的长度 L 有关的未知形状系数. 因为交流电场造成的电转矩 T_e 已知,结合(1)式可得 $T_{\eta} = \eta\omega f(L) = T_e \approx CL^3V^2$ (C 为常数),从而用实验推导出 $f(L)$ 来. 为了这个目的,在间隔为 $320 \mu\text{m}$ 的微电极中,10 kHz 下,我们测量了直径为 300 nm , 长度从 $1.7\text{--}11 \mu\text{m}$ 的金纳米线的转速 ω . 图3(a)显示出了 ω/V^2 依赖于 L 的关系. ω/V^2 起初随 L 增大,并在 $L = 6 \mu\text{m}$ 时,达到最大值,然后随 L 减小. 为了推导出 $f(L)$ 的解析式,我们用函数 $L^3/g(L)$ 来拟合 ω/V^2 , 最好的拟合公式为 $g(L) = -0.00052L^6 + 0.0138L^5 - 0.11L^4 + 0.41L^3$, 如图3(a)中的实线所示. $g(L)$ 与 $f(L)$ 的关系为 $L^3V^2/\omega = g(L) = (\eta/C)f(L)$, 只相差一个系数. 图3(b)中实线所显示的是 $g(L)$ 随 L 单调上升的性质. 所以用实验方法,我们推出了直径为 300 nm , 长为 L 的纳米线的形状公式 $f(L)$. 注意在这一长度范围内, L^3 项有最大系数,是 $f(L)$ 的主要项. 然而假如 $f(L)$ 只有 L^3 一项,那么 ω/V^2 就不依赖于 L 的大小了. 所以图3(a)中 ω/V^2 随 L 的变化,是除了 L^3 项以外的高次项的直接结果.

我们还用这个灵活的方法转动其他棒状纳米颗粒,包括 Au, Pt, Ni 纳米线(直径 300 nm , 长 $9 \mu\text{m}$) 和 MWCNT(直径 50 nm , 长 $5 \mu\text{m}$). 利用间距 $320 \mu\text{m}$ 的微电极和 10 kHz 的交流电压,我们发现各种纳米线的转动速度,同样正比于 V^2 . 但对不同的材料,如 Au, Pt, Ni 和 MWCNT,分别有不同的依赖系数 $5.4, 4.7, 4.5$ 和 $3 \text{ rpm}/V^2$ [图2(d)]. 依赖系数大致与材料的导电率成正比,因为导电率越高,材料越易被极化,转矩就越大,所以转速越高. MWCNT 的转

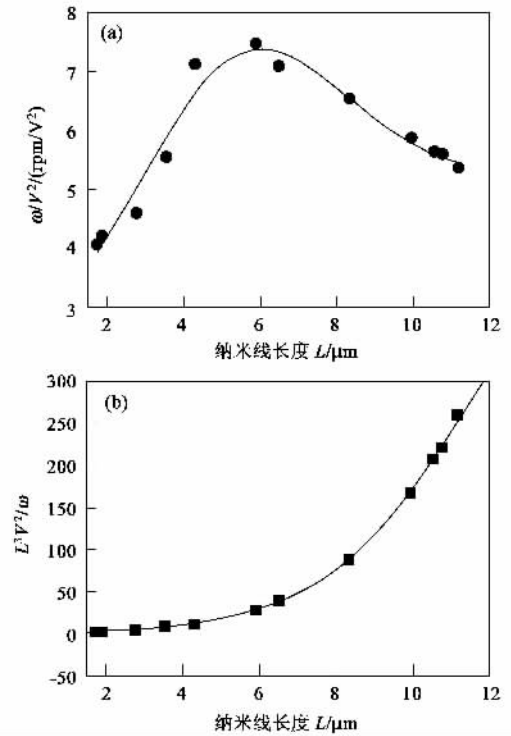


图3 (a) ω/V^2 和(b) V^2L^3/ω 与金纳米线长度 L 的依赖关系,实线是最佳拟合曲线(见正文)

速最低,这可以归结于它们远低于金属的导电率. 这个实验还表明,我们的工作,不但可以转动磁性纳米颗粒(Ni),而且可以转动非磁性纳米颗粒(Au, Pt 和 MWCNT).

为了演示转动纳米颗粒的用途,我们将一根弯折纳米线的折点通过共价键连接到硫化的石英衬底上,做成了纳米线电动机. 与常规电动机相似,连接纳米线折点和衬底的共价键作为发动机的转轴[图4(a)]. 弯折的纳米线作为转子,而4个金微电极作为定子. 在 10V 、 20kHz 交流电压的催动下,一个灰尘颗粒被纳米线电动机的两个转臂推动,做圆周运动,如图4(b),(c)所示. 因为纳米线与灰尘有时不在同一高度,推行运动有时会被错过,使得灰尘颗粒只在被纳米线鞭打到时才运动,然后就静止在原地等待下一次推动,这与正常情况下球会被棒打飞很不一样. 这种微型电动机在微流机械、微搅动机以及 MEMS^[8]中,很有应用前景.

总之,我们发现了一种通过在多个微电极上加交流电压来转动悬浮纳米线的方法. 悬浮的纳米线可以按照设定的方向、速度和总角度转动,并可以被瞬间开启或停止. 我们还用这个方法第一次推出在纳米线上的粘滞转矩和形状系数. 这种灵活的方法

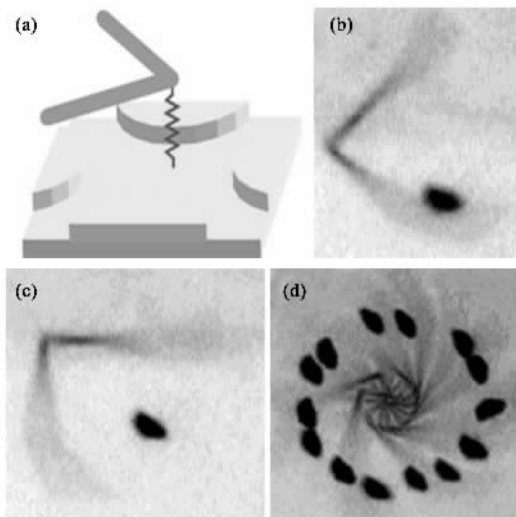


图4 (a) 弯折的纳米线通过硫化学键连在衬底上的示意图 (b), (c) 每隔 1/30s 所拍纳米线电动机的转动快照 (d) 10 V, 20 kHz 下, 弯折纳米线作为微型电动机推动灰尘颗粒, 在 1.8s 内的重叠图片

可被用来研究其他在低雷诺数下的现象, 从运输纳米小颗粒, 研究微生物运动, 到 MEMS.

参 考 文 献

[1] Purcell E M. *Am. J. Phys.*, 1977, 45 :3

- [2] Happel J, Brenner H. *Low Reynolds number hydrodynamics*. Noordhoff international publishing, 1973
- [3] Lamb H. *Hydrodynamics*. Dover, New York, ed. 6, 1993
- [4] Bentley A K, Trethewey J S, Ellis A B, Crone W C. *Nano Lett.* 2004, 4 :487
- [5] Barbic M. J. *Magn. Mater.* 2002, 249 :357
- [6] Paterson L, MacDonald M P, Arlt J *et al.* *Science*, 2001, 292 :912
- [7] Fan D L, Zhu F Q, Cammarata R C, Chien C L. *Appl. Phys. Lett.* 2004, 85 :4175
- [8] Senturia S D. *Microsystem Design*. Kluwer Academic publishers, Boston, 2000
- [9] Romero L A, Dickey F M, Holswade S C. *Journal of Microelectromechanical Systems* 2000, 9 :236
- [10] Whitney T M, Jiang J S, Searson P C *et al.* *Science*, 1993, 261 :1316; Liu K, Chien C L, Searson P C *et al.* *Appl. Phys. Lett.* 1998, 73 :1436; Liu K, Nagodawithana K, Searson P C *et al.* *Phys. Rev. B*, 1995, 51 :7381
- [11] Xia Y N, Whitesides G M. *Angewandte Chemie International Edition*, 1998, 37 :550
- [12] Halliwell C M, Cass A E G. *Anal. Chem.*, 2001, 73 :2476
- [13] Pohl H A. *Dielectrophoresis*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1978
- [14] Using the software Maxwell by Ansoft
- [15] Jones T B. *Electromechanics of Particles*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995

· 招生招聘 ·



Rensselaer

美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy, New York, U. S. A.

March, 2006

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics, Applied Physics, and Astronomy

Areas of research: Terahertz Imaging and spectroscopy, Terascale Electronics, Photonic bandgap structures, nanoelectronic quantum structures, Bio-physics, Origins of Life, Astronomy, Elementary Particles Physics. Teaching, research assistantships, and fellowships are available.

Application : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

Email : gradphysics@rpi.edu