

# 绿叶迭叠覆远山,分形枝脉韵光伏

刘俊明<sup>1,†</sup> 高进伟<sup>2</sup>

(1 南京大学物理学院 南京 210093)

(2 华南师范大学先进光电子研究院 广州 510006)

2016-06-29收到

† email: liujm@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20161110

向大自然学习是人类的一种姿态,国内外诸多学者对此孜孜以求,但似乎并不十分顺利。树叶叶脉结构是一种十分高效的运输网络结构,人类利用这种结构开展了一些诸如公共交通宏观体系设计之类的研究,但这仅仅只是树叶功能一些皮毛。从另外一个视角,如果将这些类分形结构用在透明导电电极的结构设计上,对光生载流子的捕捉和运输又将是何等一番景象?

数千年来,人类在依靠自然和摆脱自然的纠结斗争中生老病死,亦或者走向文明。这个过程,或高山流水、或晦暗无尘,有很多可歌可泣与可圈可点的历史片段,组成文明进化的甲骨文。不过,向大自然学习是人类傲视自然之后的一种姿态,到现在已成为一种时尚和高尚的标志,也让人啧啧称道。其中一个枝蔓就是仿生学了。即便到最近,仿生学也是一门听起来让人肃然起敬的学问,就像 *Nature* 和 *Science* 青睐科学考证一类的文章似的,既令人亲切又让人称奇。比如,中国科学技术大学俞书宏穷其聪颖智慧以制作还不算那么美丽的贝壳<sup>[1]</sup>、上海交通大学张荻尽佛道手腕玩弄叶脉以制造还不那么神似的骨架材料<sup>[2]</sup>,就是其中两个例子。我们有幸得到张荻老师馈赠其

大作一册,讲述他如何把玩树叶以益其心志,使得他现在看起来更加仙风鹤骨的样子。俞书宏老师当然也是帅哥一枚,平日里总是精致尽然、笑容可掬。这大概都是学问之道到了一定境界所致。

仿生学的内涵是什么并非我们所长,我们不知其然,更不知其所以然。但是,我们知道人类虽然自以为非地球之平常物类,但也并没有从大自然学到太多东西。比如,制备出一个真实的树叶,人类似乎还没有办法。即便向大自然学习使用树叶,也不过是略知皮毛,并无多少值得炫耀和自夸之处。

据说自然界最大的树叶是南美洲的亚马逊棕榈,一片叶子连柄带叶有 24.7 m 长。树叶之类漫山遍野,从数学物理学角度看最可几的就是叶脉了,示于图 1(a)。

叶脉型材芊瘦,用仙风道骨形容较为妥帖(张荻老师对此是否有戚戚然之感?)。在下狂妄,概括其基本特征如下:分支结构,一级一级分叉;其躯干每经一级分级都变瘦,直径减小;向空间延伸无特定的取向,哪里营养来源丰富就向哪里分叉延伸。此种延伸之势,虽生气勃勃时不能无穷无尽,然枯萎飘落之前也应该是未尽的梦想。这种结构被后人比作为物理上的分形结构,如图 1(b),引起广泛关注。

利用仿生学和材料科学的原理与技术制备叶脉有很多尝试,一些看起来像叶脉结构的材料也有报道。分形结构没有特征长度,越是往小尺度放大,其枝干就越细小。这种几何特点多用代数的幂律表示,亦是无穷无尽,与树叶的生死梦想一致。

看君到此,稍作休息,我们花开两朵、各表一支。

透明导电电极,犹如动物之眼,在光电器件中必不可少,例如太阳能电池、显示、智能窗户等。但遗憾的是“鱼和熊掌不可兼得”,对导电性很好的金属而言,光学透明与导电性本身就是一对矛盾,无法同时做到高透光和高导电性(最近好像有“好事之徒”说有办法)。掺

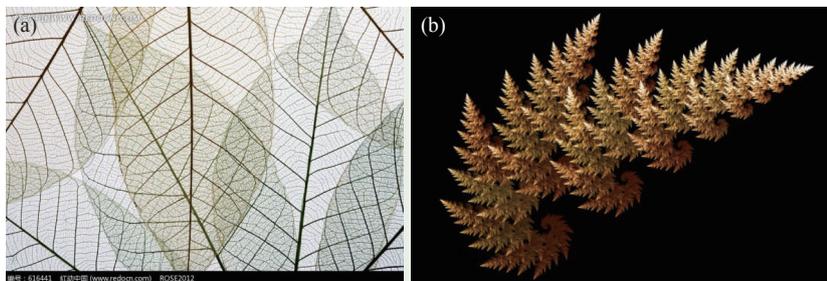


图 1 (a)树叶叶脉实物图(<http://img.sucairedocn.com/attachments/images/>); (b)分形叶脉示意图(<http://www.fractalsciencekit.com/fractals/>)

杂金属氧化物可以折法其中，部分解决问题。例如氧化铟锡(ITO)一直是透明导电电极材料的主角。随着光电产业不断扩张与光电器件轻量化、智能化、可穿戴化等要求(图2)，以ITO为代表的传统透明电极材料主角地位遭到挑战，主要基于两点：一是金属铟材料价格日益昂贵；二是柔性可穿戴器件需要柔性透明导电衬底，ITO无法适应。

基于此，有些人夜不能寐，提出了多种解决方案。例如用碳纳米管、石墨烯、纳米线电极、金属网格电极等等。这其中，金属网格电极的兴起有噱头，引起了我们的关注。以光伏效应利用为例，看看我们如何体会其中一点门道：花开两朵，能不能合为一支？

众所周知，光伏材料在光激发下产生电子/空穴载流子，它们既经物理而离别，也因物理而亲合，如图3(a)所示。分则达济天下苍生，合则幻灭归于虚无(成为光子并衍生热量)，这与中华文化背道而驰。为了应用光伏，我们希望“分”而尽可能杜绝“合”。要杜绝“合”，就要在幻灭之前通过电极将它们分别导出来。当然，其中环节多有繁复，我们只看我们喜闻乐见的过程。如果我们将图3(b)之类的分形叶脉电极覆于光伏材料上，就会看到，分形结构没有特征长度这一几何性质真的就是为此而生的，令人激赏。

如果载流子在光伏体里面统计均匀分布、各向同性运动(这个假定应属合理)，那么我们会看到：

(1)相距较远的电子-空穴将最大可能被叶脉主干所捕获，相距较近的电子-空穴将最大可能被叶脉枝蔓所捕获。分形结构恰到好处地

做到了这一点。理想条件下，哪怕是那些相距很近很近的电子-空穴对都能够被枝蔓的最小枝杈捕获，“无一落网”。

(2)假定叶脉电极电导能力(率)为常数，则分形叶脉主干粗大、叶脉枝蔓细小的特点正好使得主干将流过那些细小枝蔓的光电流收集起



图2 柔性、可印刷、可穿戴现代电子器件和设备。这些应用需求充分体现了人类的懒惰、退化，古人斥责“饭来张口衣来伸手”已经不足以鞭答人类的“贪欲”(图片来源于网络)

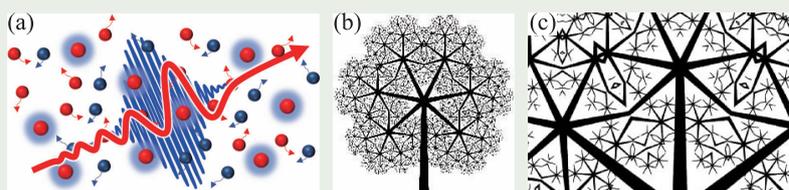


图3 (a)光生载流子分离复合(<http://mainz-thz-group.weebly.com/>); (b)分形结构(<http://www.rotslab.nl/>); (c)分形局部放大结构

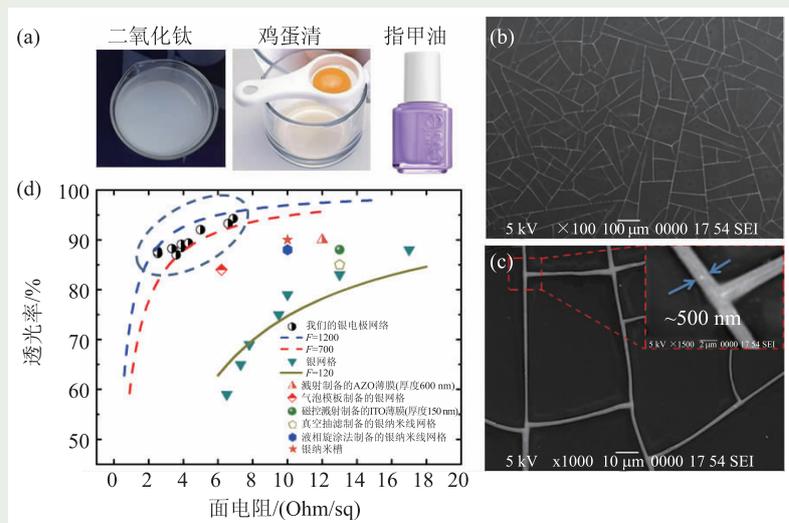


图4 龟裂网络透明导电电极 (a)所用的吸收层模板；(b-c)亚微米金属网络透明导电电极扫描电子显微镜(SEM)图；(d)透明电极光电性能图(虚线以内为我们的数据点)

来,不耗费额外的单位体积(面积)焦耳热。

(3)分形叶脉的粗细不均与没有特征长度之特点也将电极覆盖导致的光照面积损失降到最低,从而保证最大限度的光照而获取最高的光生载流子激发可能性。

上述三点是那么地强强联合、优势互补,将一个理想光伏网络电极的概念阐释到淋漓尽致的程度,让我们不得不感叹自然之子——分形叶脉的奇妙精到。

接下来的事情就是中国科学

院物理研究所神人曹则贤老师所说的:思想有了,实验就有了!不过,这里是一个算不上正能量的例子:具体结构设计、合成、材料、工艺等等问题,就像世间之事,将美如桃花的梦想摧残到昨日黄花,有正面结果,但不是很理想。

无妨,无妨。华南师范大学的高进伟用这一思路做了大量屡败屡战、屡战屡败的尝试,包括用鸡蛋清、用高分子胶、用各种有机无机热的冷的物理的化学的路数,取得

了一些还算不错的进展:

(1)使用龟裂模板法制备亚微米随机金属网络电极,克服纳米线电极缺陷:高雾度、接触电阻大的问题,也克服了金属网格电极线宽大所带来的莫瑞干涉效应,获得了不错的结果,其结果2014年在 *Advanced Materials* (DOI: 10.1002/adma.201302950)封面刊出(图4)<sup>[3]</sup>。

(2)将一片小树叶变成透明导电网络,实现树叶分形结构金属网络透明导电电极,透光性和电学传导性能良好,也具有良好的机械柔性,其结果2014年在 *Nature Communications* (DOI: 10.1038/ncomms6674)刊出(图5)<sup>[4]</sup>。

(3)利用低成本液相法选择性电沉积金属,获得了超低表面电阻( $R_s \sim 0.8 \text{ Ohm/sq}@T\% \sim 85\%$ )金属网络电极,其光电优值达到了31000。同时金属网络电极的宽度在1—5  $\mu\text{m}$ 之间,金属带之间的间距为10—50  $\mu\text{m}$ 。由于亚微米纳米带的 Ribbon 效应,电沉积导致亚微金属带的表面电阻迅速降低,而透光率增加缓慢,显著提高金属网络电极的光电性能。该超低表面电阻金属网络电极为高效率薄膜太阳能电池和大功率LED器件提供了理想的窗口电极。该成果近期在 *Advanced Materials Technologies*(DOI: 10.1002/admt.201600095)在线刊出(图6)<sup>[5]</sup>。

(4)提出一类光电器件中理想的透明电极结构,在确保相同透光率条件下,金属网络达到最大覆盖面积(垂直电荷收集与注入)、网络电阻达到最小面电阻(面内电荷输运)。通过一系列规则与非规则、多级拓扑结构的加工、设计和对照研究,似乎揭示了叶脉多级分形结构的优越性,基本解释了分形和多级结构电极对电荷输运的影响机

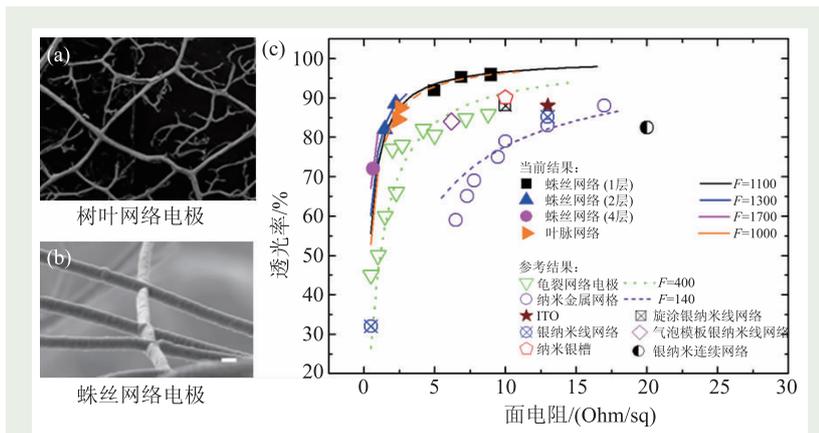


图5 (a)树叶叶脉电极和(b)蛛丝网络电极SEM图; (c)电极光电性能图

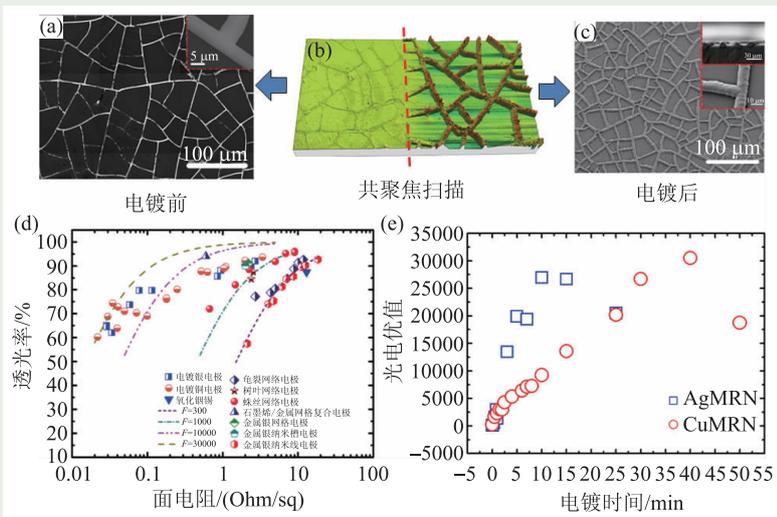


图6 (a)电镀前金属网络电极SEM照片; (b)电镀前后共聚焦光学显微镜照片; (c)电镀后金属网络电极照片; (d)电镀金属网络电极光电性能图; (e)电镀金属银和铜网络光电优值图

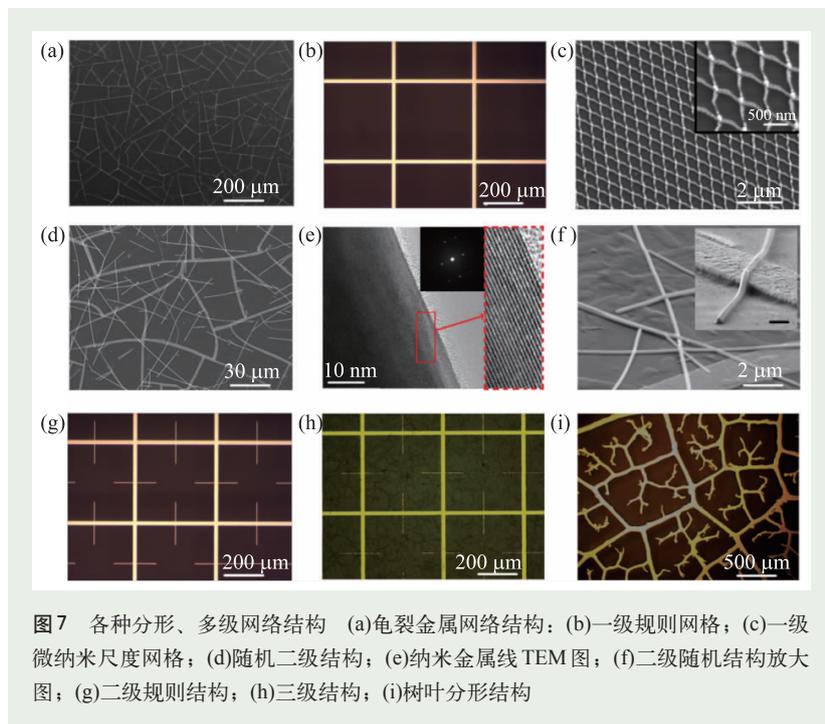


图7 各种分形、多级网络结构 (a)龟裂金属网络结构; (b)一级规则网格; (c)一级微纳米尺度网格; (d)随机二级结构; (e)纳米金属线TEM图; (f)二级随机结构放大图; (g)二级规则结构; (h)三级结构; (i)树叶分形结构

制, 其结果在最新一期 *Nature Communications* (DOI: 10.1038/NCOMMS12825) 刊出(图7)<sup>[6]</sup>。

毋庸置疑, 这些结构不仅仅在

光伏中有作用, 在类似需要这种网格电极的情况下也可以广泛借鉴使用, 例如显示面板、薄膜加热器、柔性电子器件等等。

## 用敲锣演示腔电动力学

上世纪六十年代, 物理学家在研究荧光分子时, 发现一个反射表面能够使一个发射体的衰减时间增长, 并且造成频谱的漂移。

当今, 光与物质, 以及光与反射壁的相互作用得到深入研究, 人们使用昂贵的高精度光学组件, 研究的内容涉及到腔量子电动力学(cQED)。然而, 荷兰物质基础研究基金会(FOM)所属的原子分子物理研究所(AMOLF)的Lutz Langguth课题组受到音乐的启发, 发现了一种不必使用复杂仪器就可以在课堂演示cQED概念的方法。他们展示了利用一个正在发声铜锣附近的墙壁就可以造成频率漂移, 以及锣声的衰减时间, 这正是在荧光分子中所观测到的现象。他们可以仅仅使用一台笔记本电脑和简单的记录仪器就能够展示这个效应。

这个团队使用了一面中国的铜锣, 是一种黄铜制成的盘状乐器, 表面上有一圈圈的纹路。在自由空间中,

也毋庸置疑, 这些工作最多也就是展示了一个理想是如何在人类“无能”的情况下演变为几个不那么精彩的现实。尽管如此, 作为一个茶余饭后的故事, “以史为镜, 可以知艰辛”。这是一段唱和的余音。

## 参考文献

- [1] Mao L B, Gao H L, Yao H B *et al.* *Science*, 2016, DOI:10.1126/science.aaf8991
- [2] 张荻. 自然启迪的遗态材料. 杭州: 浙江大学出版社, 2013
- [3] Han B, Pei K, Huang Y L *et al.* *Adv. Mater.*, 2014, 26: 873
- [4] Han B, Huang Y L, Li R P *et al.* *Nat. Comm.*, 2014, 5: 5674
- [5] Peng Q, Li S R, Pei K *et al.* *Adv. Mater. Technol.*, 2016, 6: 160095
- [6] Han B, Peng Q, Li R P *et al.* *Nat. Comm.*, 2016, 7: 12825

## 物理新闻和动态

锣的共振具有9个确定的频率, 范围为300—3500 Hz。他们将锣放置在混凝土墙壁附近, 然后微调之间的距离, 他们专门关注其中两个最低的频率模式, 306 Hz与561 Hz。当改变锣与墙壁间距时, 他们仔细记录谐振频率和振动时长的变化。

当锣与墙壁间距小于20 cm时, 这两个谐振频率都下降了0.1 Hz。出现这种人耳不能分辨的频率压缩的原因是, 来自墙壁反射声波使得锣的形状发生微小畸变, 因而造成频率漂移。Langguth和同事还发现, 锣附近的墙壁使得锣的持续时间受到破坏。按照这个组的推测, 锣频率的调制和延时现象对于质量高的锣更为明显, 即锣将被敲打时的机械能转换为更多声音。人们利用这种音响效应来检验锣或者其他材料的缺陷。除了声学效应以外, 他们的实验还可以扩展到超构材料、纳米天线, 以及多极子转变等领域。

(朱星 编译自 *Physics*, June 2, 2016)