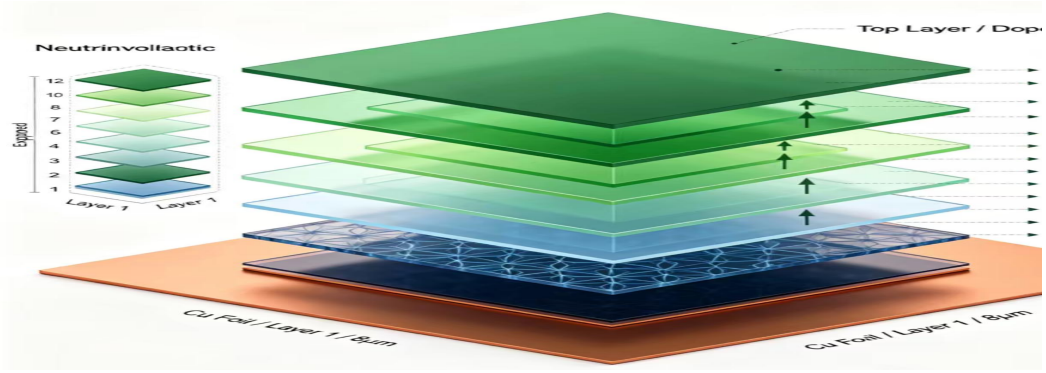
从粒子物理到薄膜工艺：Neutrinovoltaic 的材料学门槛



一片 A4 纸大小的 Neutrinovoltaic（中微子伏特）薄膜器件，在常温下测得约 2–2.5 瓦的稳定输出，来自一条与光伏完全不同的能量路径：中微子与原子核的相干弹性散射。

2026 年，LZ、XENONnT 和 CONUS+三个实验先后报告新结果，这种散射从理论预测变成多类靶核上可重复的观测。德国中微子能源集团有限公司（Neutrino Energy Group）则把标准化二维原型、中试和深圳量产分别定在 2027 年 6 月底、2027 年底和 2028 年第二季度。两条时间线交汇，问题随之具体：一片 1.4 微米厚的膜，如何把极弱的核反冲变成可用的电流？

切开后，断面是 12 层明暗相间的结构。总厚约 1.4 微米，平均每层一百多纳米；石墨烯只有 3–5 个原子厚，界面层也只有几个纳米，厚度主要来自掺杂硅。它面对的环境能量不止中微子：太阳与宇宙线中微子、宇宙线μ子、真空电磁场涨落、红外辐射、环境热梯度、机械振动，都可能在膜内留下极微小的能量。中微子只是其中一条线，却最能说明技术难点。

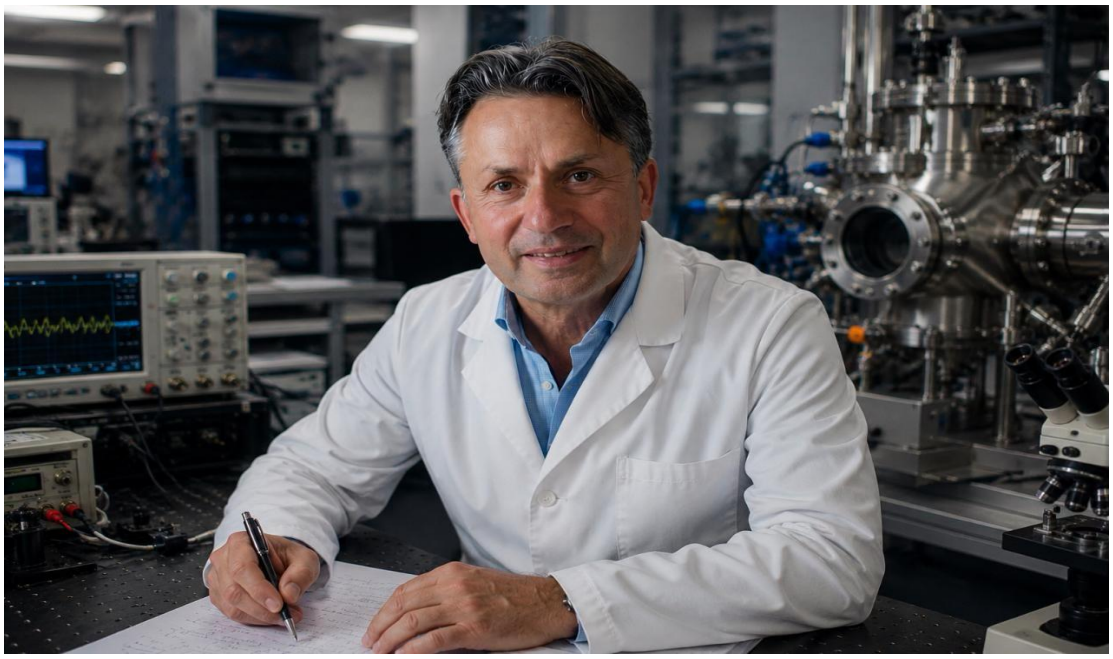
信号极弱，器件只能靠体积累积

中微子穿过钢板几乎不留痕迹。太阳中微子每平方厘米每秒约 650 亿个穿过地球，它们不带电，只通过弱相互作用与物质作用，因此“用中微子发电”近乎悖论。转机来自 1974 年 Freedman 提出的相干弹性中微子-原子核散射（CEvNS）：低能中微子的波长远大于原子核，它与整个原子核相干作用，而不是逐个核子碰撞。相干条件下，散射截面按中子数平方增长；以氙-132 为例，78 个中子带来约六千倍增强。

相干有严格前提。中微子能量一高，波长变短，只能与单个核子发生作用，相干增强随之消失。CEvNS 因此是低能中微子最有效的通道之一。实验证据从 2017 年起积累：COHERENT 合作组当年用碘化铯首次观测到该效应，显著性 6.7σ；2026 年，

LZ 和 XENONnT 分别以 4.5σ和 3.3σ测到太阳中微子与氙核的散射；10 月，CONUS+在瑞士核电站旁用高纯锗得到 10.2σ信号，事件数与标准模型预期在 0.6 个标准差内一致。三类靶核相互印证，CEvNS 已得到独立支持。

难点在能量尺度。3 MeV 的反应堆中微子打在锗核上，反冲能量最多几百电子伏特。探测器阈值必须压到 0.1 keV，也就是 100 电子伏特左右，还要尽量靠近中微子源。对 1.4 微米厚的膜来说，单个中微子的作用几乎可以忽略；但一平方米的膜里有天文数字的原子核，昼夜都有通量穿过。器件输出不是某一个中微子的贡献，而是体积内所有原子核在整段时间里被撞到的统计总和。



德国中微子能源集团 CEO、数学家 Holger Thorsten Schubart 博士，把这个统计写进了主公式的体积分：

$$P(t) = \eta \cdot \int_V \Phi_{eff}(r,t) \cdot \sigma_{eff}(E)\, dV$$

Φeff 是单位面积、单位时间通过的中微子数；σeff 是每个原子核提供给中微子的有效靶面；dV 是膜内体积元；η是把核反冲变成电能的比例。积分把整片膜里所有可能参与散射的原子核加在一起。dV 并非数学装饰，它直接对应工程上的三件事：做厚、做多层、做大面积。12 层堆叠，是为了在同样投影面积内增加参与散射的原子核数量，不是为了截面好看。

中微子把能量和动量交给界面层，界面层随之发生谐振，这个过程可以独立测量。但这些核反冲能否高效变成电能，还没有答案。“有没有输入”和“能不能转换”是两个问题。要把输入变成输出，第一道门槛是材料：它必须同时导电和不导热。

石墨烯的作用，是把电荷与热分开

金属和半导体中的电子在输运电荷的同时也输运热量。弱能量收集的关键障碍是这种热短路：一边刚建立一点电势差，另一边热量已经把温差拉平。理想材料要同时满足三点：电荷容易流动，热量不容易沿同一路径流走，缺陷足够少。石墨烯被选中，是因为它在特定条件下能把电荷和热拆开。

2025 年，印度科学理工学院与日本国立材料科学研究所的团队在《自然·物理》发表了一项研究：在极高纯度的石墨烯样品上，他们把费米能级调到狄拉克点，也就是载流子浓度最低的电荷中性点。此时电子不再像独立粒子，而像集体流动的流体，几乎不互相碰撞，论文称之为狄拉克流体。更反常的是热与电的关系：电导率上升时，热导率反而下降，两者偏离经典维德曼-弗朗茨定律超过 200 倍。经典定律的前提是电子像台球一样各自扩散；当电子开始集体流动，这个前提不再成立。

对能量收集来说，这个区间的意义很直接：电荷可以高速定向流动，热却不会沿同样路径把梯度抹掉。热量一旦把温差拉平，电势差也站不住。

但狄拉克流体出现在几十到一百多开尔文的低温区，远低于室温。室温下的石墨烯是另一套物理。2020 年，阿肯色大学 Thibado 团队在《物理评论 E》发表论文，室温下自由悬浮的单层石墨烯会因热涨落持续起伏，通过带二极管的电路产生交变电流，时间平均功率在皮瓦量级。皮瓦是万亿分之一瓦。系统仍处于热平衡，输出功率等于热浴输入的功率，没有违反热力学，只把原本耗散掉的涨落整流出极小一部分。

低温下，石墨烯显示电荷与热可以解耦；室温下，它显示涨落可以被整流。但皮瓦级实验与公司公布的旗舰产品 Power Cube 目标值之间，仍隔着多个数量级的距离：5–6 千瓦、1500 平方米活性材料，折合 3.3–4 瓦每平方米；一平方厘米约 0.33–0.4 毫瓦，比皮瓦高八个多数量级。材料给出的是物理可能性，能不能变成可用功率，还要看器件和工程。

整流发生在原子级界面

中微子撞上原子核，给的是一个极短、随机的动量脉冲。要把这种脉冲变成直流电，必须整流。传统方案是 PN 结，但石墨烯-硅体系的整流不靠宏观 PN 结，而靠每个界面上的不对称。

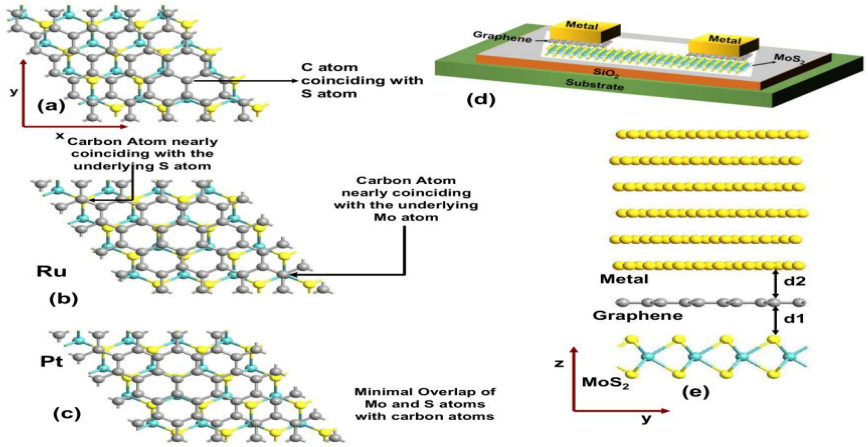
2026 年 6 月，中国科学院金属研究所孙东明、刘驰团队联合中国科学院上海微系统与信息技术研究所、华东师范大学、中国科学院微电子研究所，在《自然·通讯》发表硅-石墨烯-锗势垒晶体管。他们在锗衬底上外延生长晶圆级单晶石墨烯，再叠上单晶硅膜，石墨烯与硅、石墨烯与锗形成高度不对称的肖特基势垒。共射极电流增益达到 1.8×10^{7} ，本征截止频率 132 GHz，两项指标都是同类器件的最高水平。

这个器件的关键不在石墨烯的导电性，而在界面不对称：对称势垒允许双向通过，无法整流；不对称势垒才有单向性。石墨烯的量子电容让势垒高度随载流子密度变化，这种非线性正是把随机脉冲整理成直流的前提。

界面层的厚度因此成为物理设计参数。以 Al_2O_3 钝化的石墨烯/硅结构为例，2–3 纳米的绝缘层里，电压低时电子靠隧穿过去，电压高时势垒被压薄，电流迅速上升。厚度、带阶、界面粗糙度共同决定它是漏电的墙，还是可控的阀。如果每一层石墨烯与掺杂硅的界面都是不对称势垒，12 层就像 12 道单向阀串在一起。界面层必须足够薄，让载流子穿过去；足够完整，把缺陷和漏电通道堵住；还要足够稳定，在冷热循环里不扩散、不反应。三个要求彼此制约，界面因此成了核心部件。

势垒晶体管工作在吉赫兹，不是能量收集器。它能说明石墨烯-半导体界面可以被工程化到原子级，并产生可控的非线性输运；不能说明这种界面能把中微子引起的核反冲高效整流成可用功率。前者是后者的必要条件之一，但不等于后者已经成立。界面也不是越多越好：每加一层，就多一组缺陷和热阻。

12 层：效率、缺陷与热阻的折中



直觉上，层数越多，界面越多，能接住的能量越多。工程上并非如此。每加一层，多一个界面，也多一组缺陷和热阻。

2026 年 8 月，《科学·进展》第 12 卷第 34 期发表了一项把界面间距变成设计变量的工作。研究者在 Bi_2Te_3/金属多层膜里，把界面间距做成 5、10、15 纳米的梯度分布，跨平面热导率压到 0.22 W/(m·K)，室温热电优值达到 1.51。声子会被界面反复散射，电子面对 5–15 纳米的间距则基本只看到一个个台阶，“挡热不挡电”可以在结构上做出来。

同一时期，清华大学曹炳阳、王海东团队与北京大学刘开辉团队在《自然·电子》发表三层范德华异质结 MoS_2/MoSSe/WSe_2 的热整流结果：总厚度不足 5 纳米，两

个界面的扭转角独立可调，热整流比在 23%–104%之间连续变化。2026 年 8 月《ACS 应用材料与界面》上的 BN 修饰 $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ 薄膜则显示，总厚度不变，改变界面周期本身就能调声子散射，而不必牺牲电导。

三项工作指向同一个结论：层数并非越多越好，界面间距、界面质量、界面化学才是关键变量。Neutrinovoltaic 的 12 层是交替结构：石墨烯、掺杂硅、界面层反复出现；总厚 1.4 微米，平均每层一百多纳米，石墨烯只有原子级厚度，厚度主要来自掺杂硅。层数一多，生长褶皱、转移裂纹、界面粗糙度、掺杂互扩散都会增加，界面带来的增益会被复合损失抵消一部分。电子还要穿过这些界面；势垒太高、界面太糙，电子没到电极就被散射掉。12 层是当前工艺窗口的折中，并非理论最优。

上述热电和热整流实验用的是 Bi_2Te_3 、MoS_2 体系，不是石墨烯-硅，数值不能直接套用。但判据仍适用：多层结构必须精心设计周期，简单堆叠不行。设计图可以画得很漂亮，难的是把它长出来。

四种工艺的兼容，才是产线门槛

这片膜只有四类功能层：铜箔衬底、石墨烯、界面层、掺杂硅，对应 CVD、PVD、ALD、PECVD 四种工艺。单看每一种，都是半导体工业的成熟工艺；放在一起，却互相冲突。

石墨烯要在铜箔上高温生长，长出来是多晶，有晶界和褶皱，转移到硅上时容易裂。界面层用 PVD 长得快，但表面粗糙；用 ALD 长得准，但慢，而且很难做原位掺杂。

掺杂硅用 PECVD，一边沉积一边掺硼或磷，但等离子体会打坏下面的石墨烯，后续高温又会让掺杂原子向界面扩散。更麻烦的是顺序：CVD 要高温，ALD 要低温；PECVD 要等离子体，石墨烯怕等离子体；硅要在石墨烯上成核，石墨烯表面又几乎不让它成核。四种工艺的热预算、气氛和界面要求彼此冲突，能把它们排成一条不互相破坏的流程，本身就是独立的工程成果。

更难的一关，是每一片都能做出来，而不只是实验室里做出来一片。实验室靠手艺，产线靠设备、计量、良率和寿命数据。物理、材料、工艺三件事的成熟度并不一样。



量产时间表

Neutrinovoltaic 已经走到“能做”的阶段，但能做出样品，不等于能做好、做稳、做便宜。已经立住的是物理、材料和工艺层面的几项进展：CEvNS 在多类靶核上得到独立支持；石墨烯在低温下进入狄拉克流体区间；界面可以做出不对称势垒；多层结构能挡声子、放电子；四种工艺各自都有成熟的控制手段。

还没有立住的是室温器件复现、整流效率、12 层一致性、长期寿命和独立计量；公司 A4 样品数据仍缺第三方复现。按目前的安排，这几项要在三个月内，在深圳的实验室逐项推进。三个月能拿到数据和样机，拿不到产线节拍。

工业规模生产的路线已公布。按集团公开资料，2027 年 6 月底推出标准化二维原型，2027 年底完成中试批量制备验证，2028 年第二季度在深圳产业园量产特种能源模块。产品侧，A4 纸面积样品的实验室输出约 2–2.5 瓦、开路电压约 1.2 伏；单块 200×300 毫米发电板在 20°C 下标称约 1.5 伏、2 安；旗舰 Power Cube 目标 5–6 千瓦连续输出，按 1500 平方米活性材料反推，系统级面功率约 3.3–4 瓦每平方米。这些是公司公布的数据与时间表。两者并非同一测试件。

用公式看这条路线，就是把这个积分做大：做厚、做多层、做大面积，同时提高 η。分水岭在于，这条产线能不能把良率、寿命和成本同时压进可交付区间。

要判断它有没有跨过“器件”门槛，看四件事：输入能量是否被完整计量；输出是否随输入线性变化；同一批器件的效率分布；连续运行几千小时后的衰减曲线。三条界限也要分清：低温现象不等于室温机理，机制存在不等于器件好用，实验室样品不等于产线良率。

中国在这条链上并不是旁观者。JUNO 正在把中微子物理的测量精度推到世界前列，珠三角又有石墨烯、掺杂硅、铜箔和精密设备的产业配套。难的是中间那段：把实验室里的答案压进一条稳定产线。短期内，它更可能先以特种能源模块的形式，出现在不方便拉电线的场景，难以直接进入手机充电等消费级产品。A4 纸大小的膜现在

能做的，可能只是让一只传感器亮起来；要让它从样品变成货架上的产品，决定命运的仍是下一炉的良率、下一批的寿命，以及下一次由独立团队做出的复现。

Holger Thorsten Schubart 博士的公开信

作为一名德国数学家，我多年来一直在探索自然中那些不可见的可能性。今天，我确信，中国就是我要迈出下一步的地方，把这一科学愿景变成产业现实。

德国教会我科学思维的力量。中国以其把知识转化为进步的非凡决心，给了我启发。

在深圳，我看到了一些不寻常的东西：科学好奇心、先进材料专长、工程人才，以及跳出常规局限思考的产业勇气。

Neutrinovoltaic 技术代表一种根本不同的能源未来的可能性。它的全部潜力仍需通过严谨的科学和工程来证明。但我决心在中国迎接这一挑战。

我不把中国只看作制造我们技术的地方，我把中国看作我们可以共同建设其未来的地方。

我相信，我们合作最伟大的成就，不能用工厂、专利或财务成功来衡量。

它将用我们能给全世界人们的生活带去多少光来衡量。

科学是普遍的，我们的决心是坚定的。我们的未来，始于我们在中国共同建设的东西。

Holger Thorsten Schubart
数学家，Neutrino Energy Group 创始人兼 CEO