

# 高效微液滴动电能量转换研究

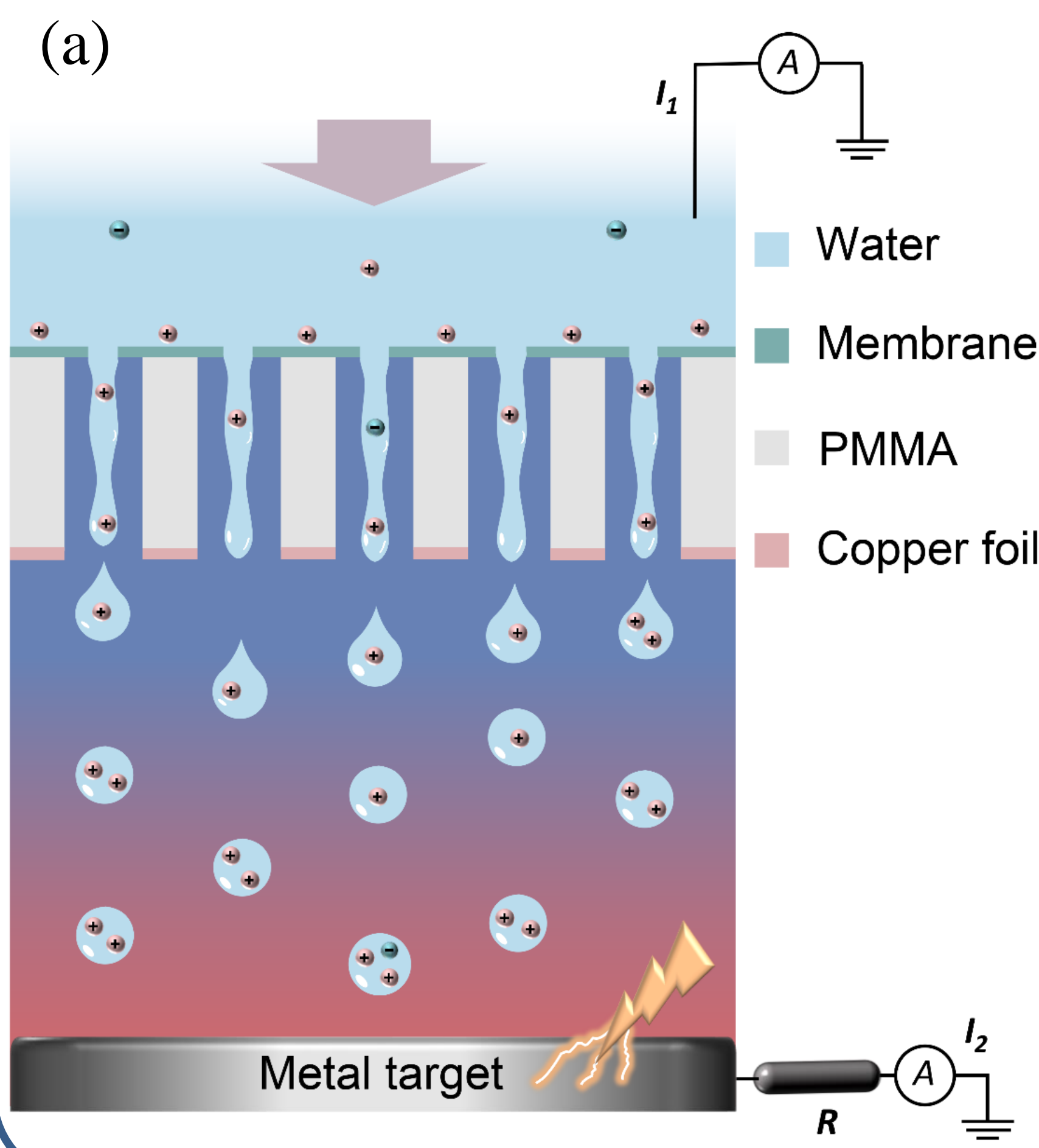
徐大翔<sup>1,2,\*</sup>, 谢彦博<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> 西北工业大学物理科学与技术学院

<sup>2</sup> 西北工业大学极端力学研究院

ybxie@nwpu.edu.cn

## 1. 介绍 Introduction



高效微液滴能量转换系统中<sup>[1]</sup>, 受压液体在微尺度孔处形成Rayleigh射流。由于Plateau-Rayleigh不稳定性<sup>[2]</sup>, 射流将断裂形成高速运动带电微液滴, 压力能转换为液滴的动能。液滴电荷主要来源于德拜层净电荷的流动和静电感应, 带电液滴被收集在连接负载电阻的金属靶上, 并在靶-薄膜之间形成对液滴减速的电场, 液滴动能转换为电能。电荷输运过程中被贮存在气/液界面并随着液滴运动, 有效避免了传统壁面流动处的摩擦产生的高能量损耗。基于单股微射流创造了动电效应近80%效率的新突破; 在保持约40%效率的同时, 系统产生的电压可降至4 kV。此外, 以9孔阵列作为能量转换单元可产生1.9 mW的功率和8.4 kW/m<sup>2</sup>的最大功率密度<sup>[3]</sup>。

## 2. 研究方法 Methods

流体受压形成射流及液滴阶段:

射流速度:

$$Q = v_j \cdot \pi a^2 \quad (1)$$

液滴速度:

$$v_{dr} = v_j \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{\rho_w a v_j^2}\right) \quad (2)$$

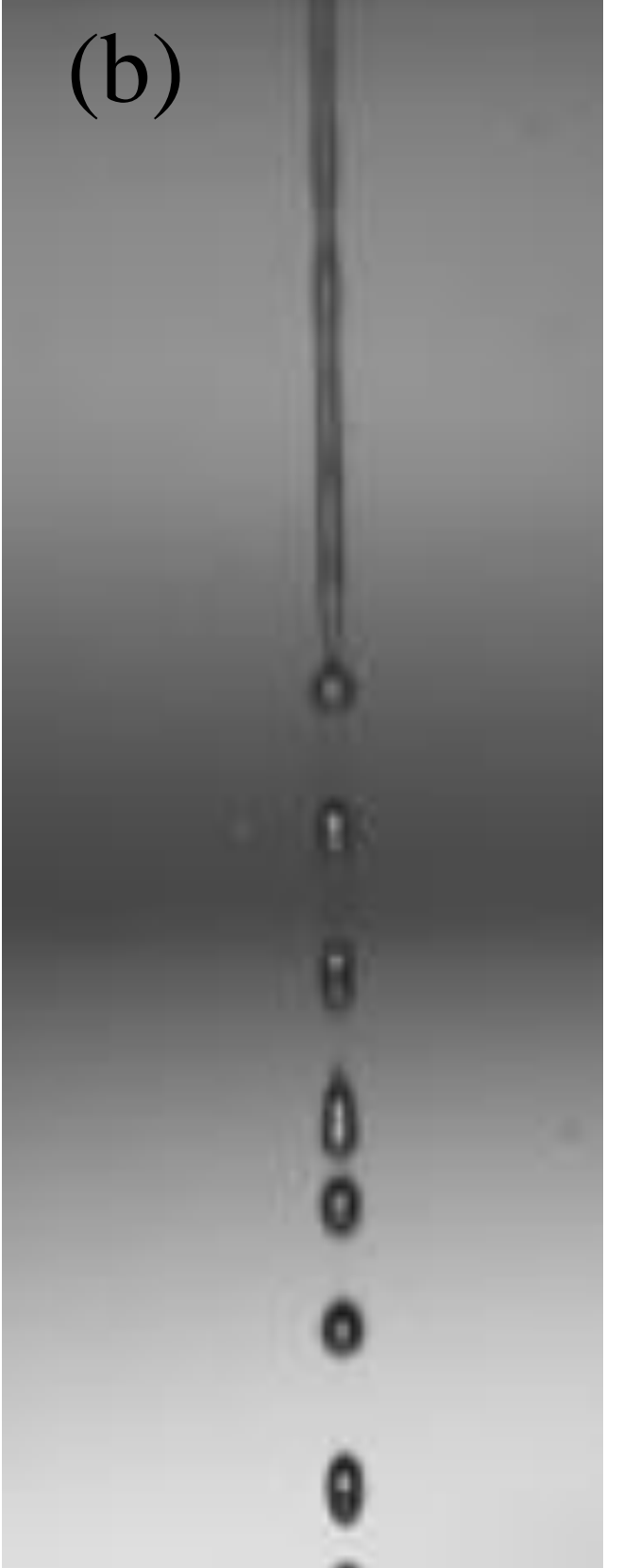
水动力能量转换效率:

$$Eff_{kin} = \frac{v_{dr}^2 \rho_w}{2p} \quad (3)$$

带电液滴收集阶段: 动能转换为电能

$$\text{产生靶电势: } V_{target} = I_2 \cdot R \quad (4)$$

$$\text{系统能量转换效率: } Eff = I_2 \cdot \frac{V_{target}}{p \cdot Q} \quad (5)$$



## 3. 实验结果 Results

### 3.1 效率

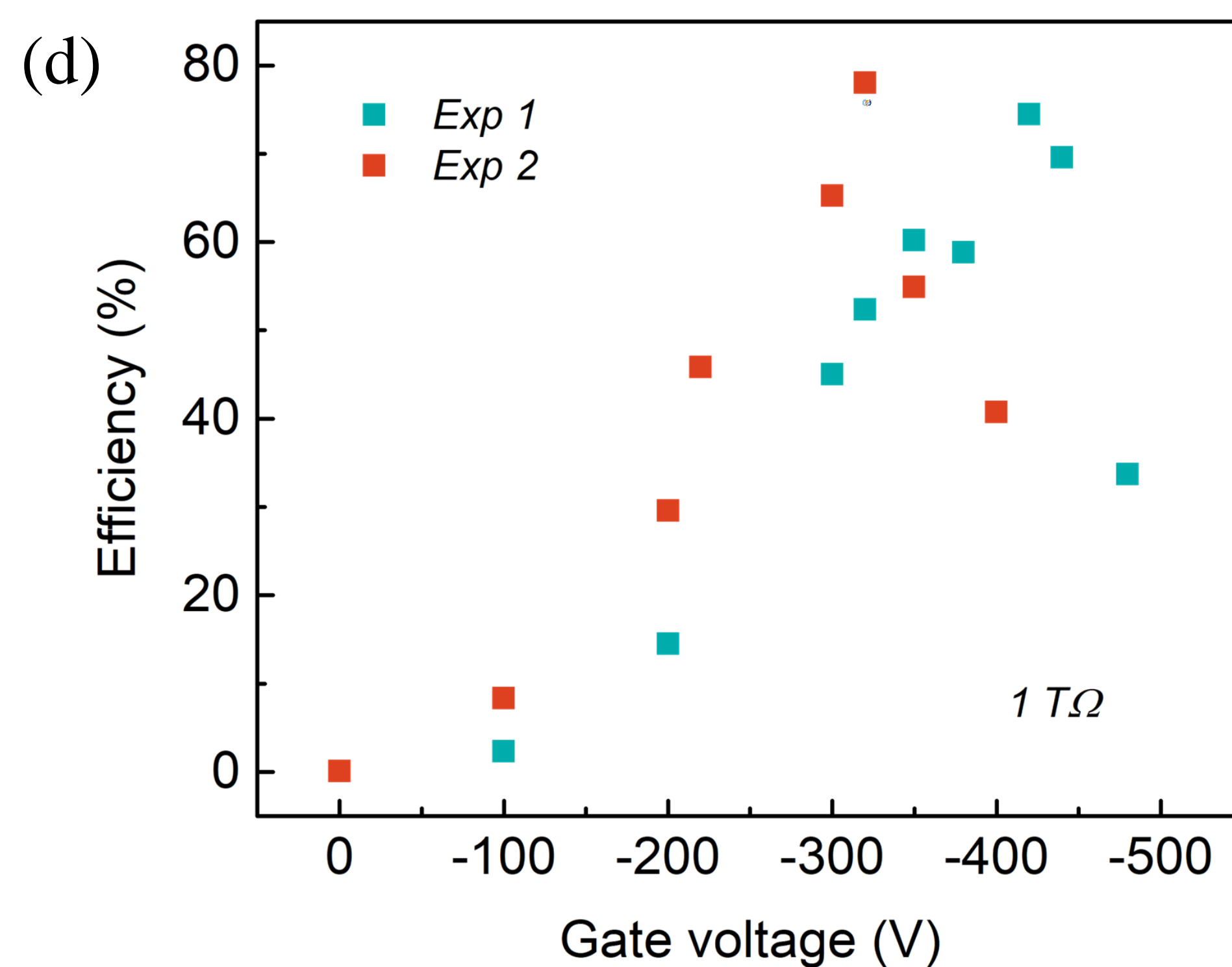
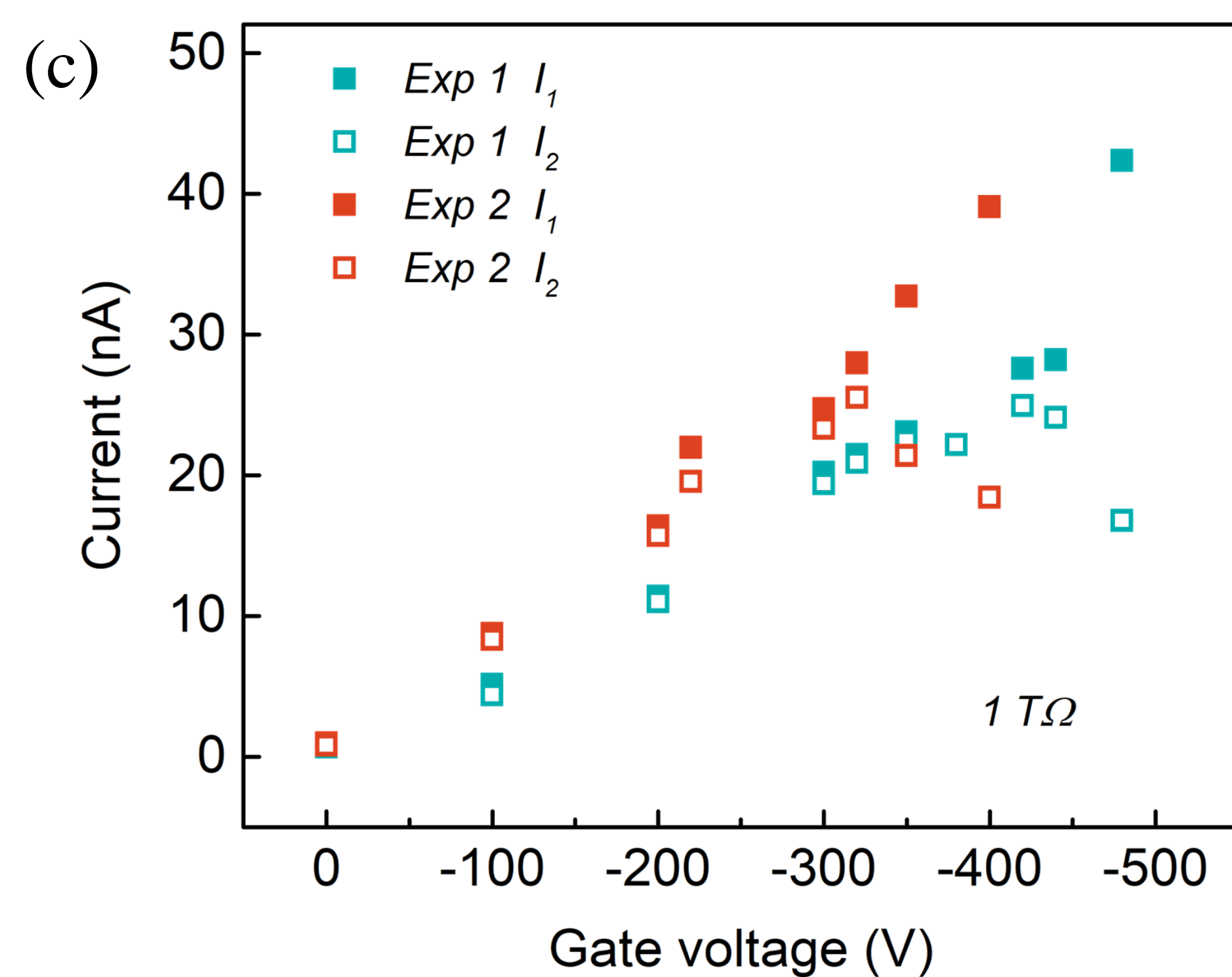
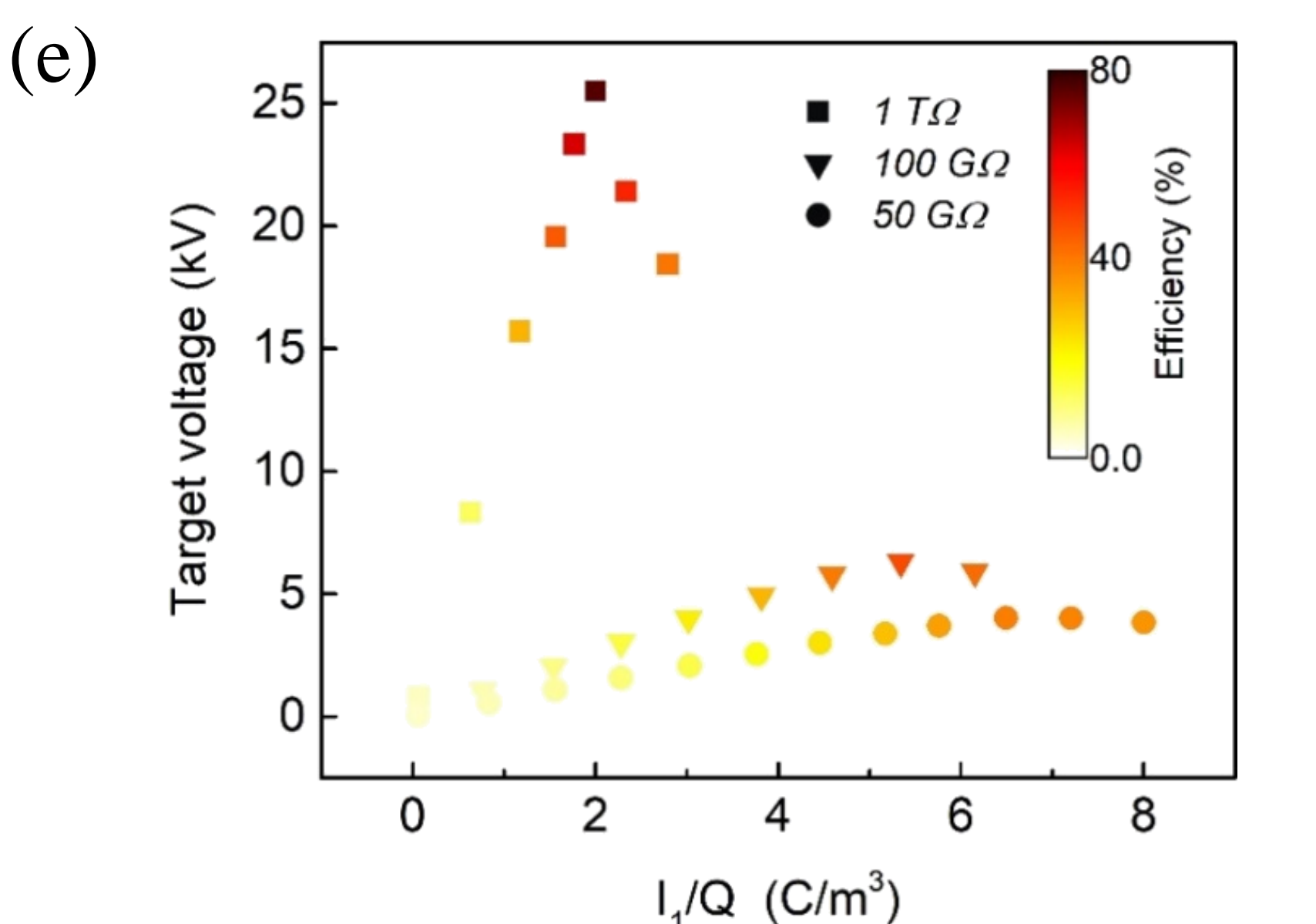


图 (c)记录了两次独立实验测得的感应电流 $I_1$ 和金属靶上的电流 $I_2$ 随静电感应电压的变化。 $I_1$ 与 $I_2$ 几乎相等且随着电压的增加而线性增加, 这表明所有的带电液滴都被收集。随后 $I_2$ 显著下降, 这是由于液滴之间电荷排斥导致液滴分散加剧, 造成能量损失。临界电压下对应的 $I_2$ 即为系统能量转换效率最高处。

实验测得 $I_2$ 最大值为25.52 nA; 根据式(5), 图 (d)计算系统能量转换效率最高为~80%。实验条件: 孔径 50  $\mu\text{m}$ ; 0.1M KCl 溶液; 施加压强 591 mbar; 平均流速 14.13  $\mu\text{L/s}$ ; 负载 1 T $\Omega$

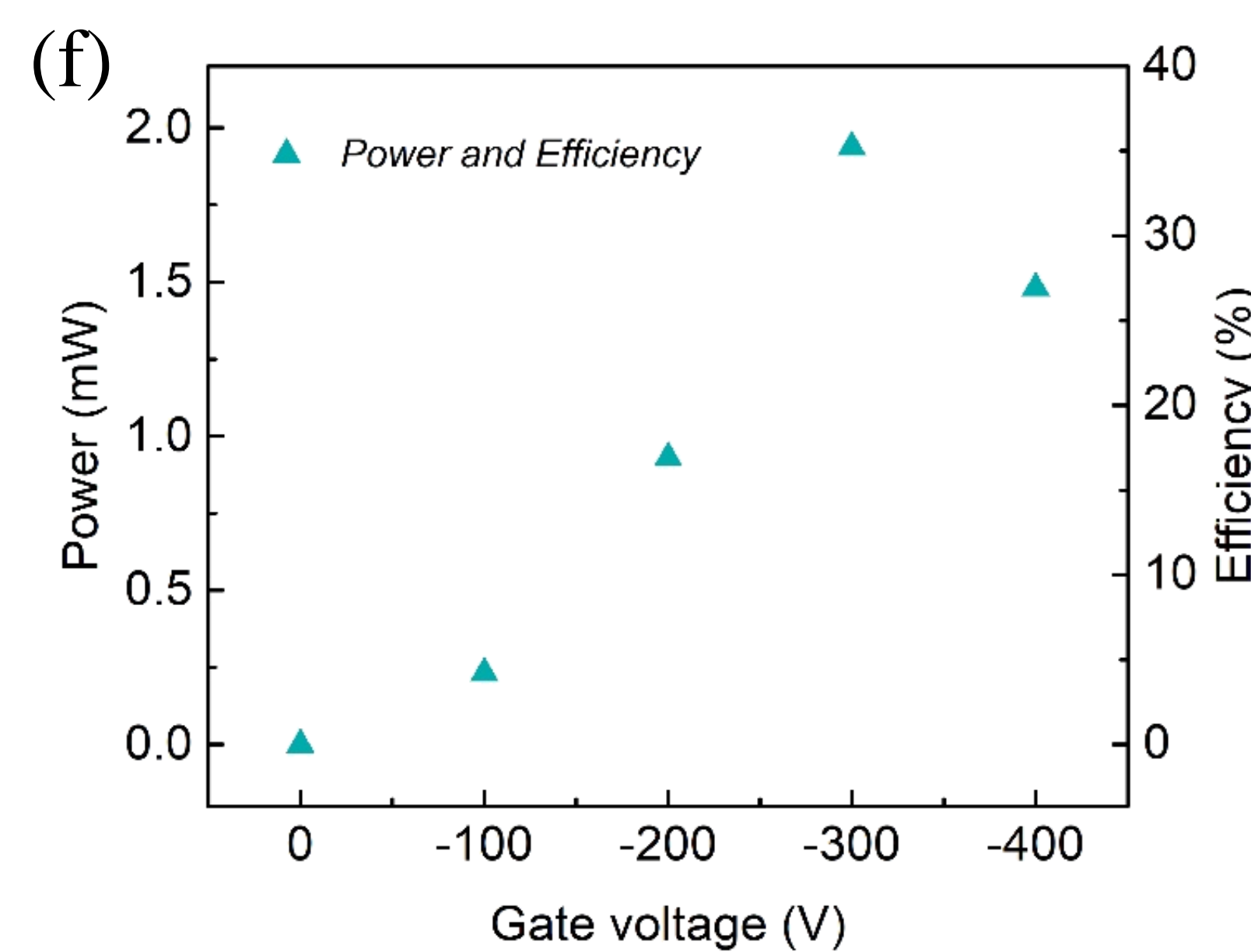
### 3.2 产生电势



$$1/2 m_{dr} v_{dr}^2 = q_{dr} V_{target} \quad (6)$$

根据能量守恒, 提高电荷密度有助于降低靶电势。当 $I_2$ 达到80 nA时, 电压可降低到4kV, 效率~40%。

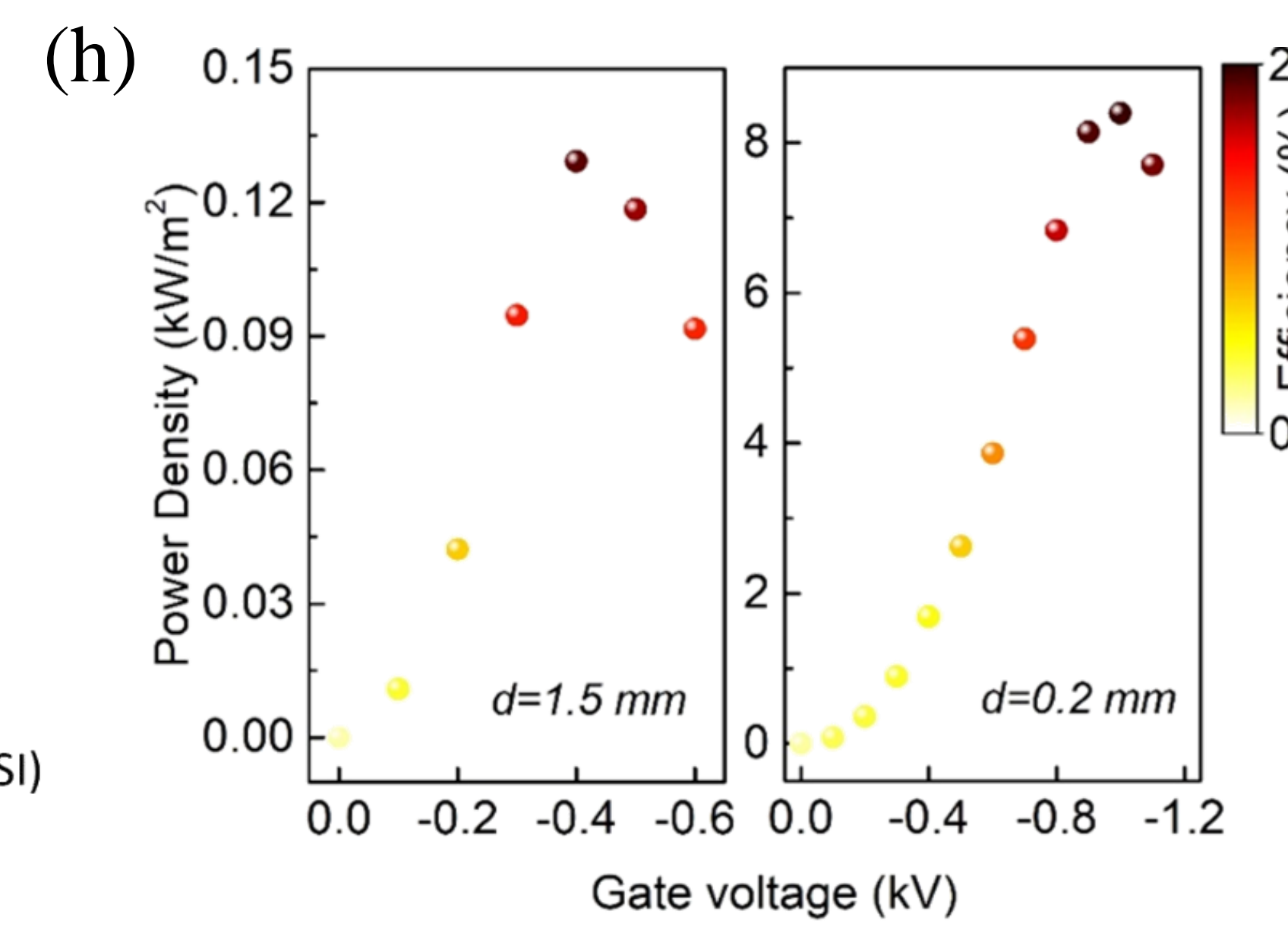
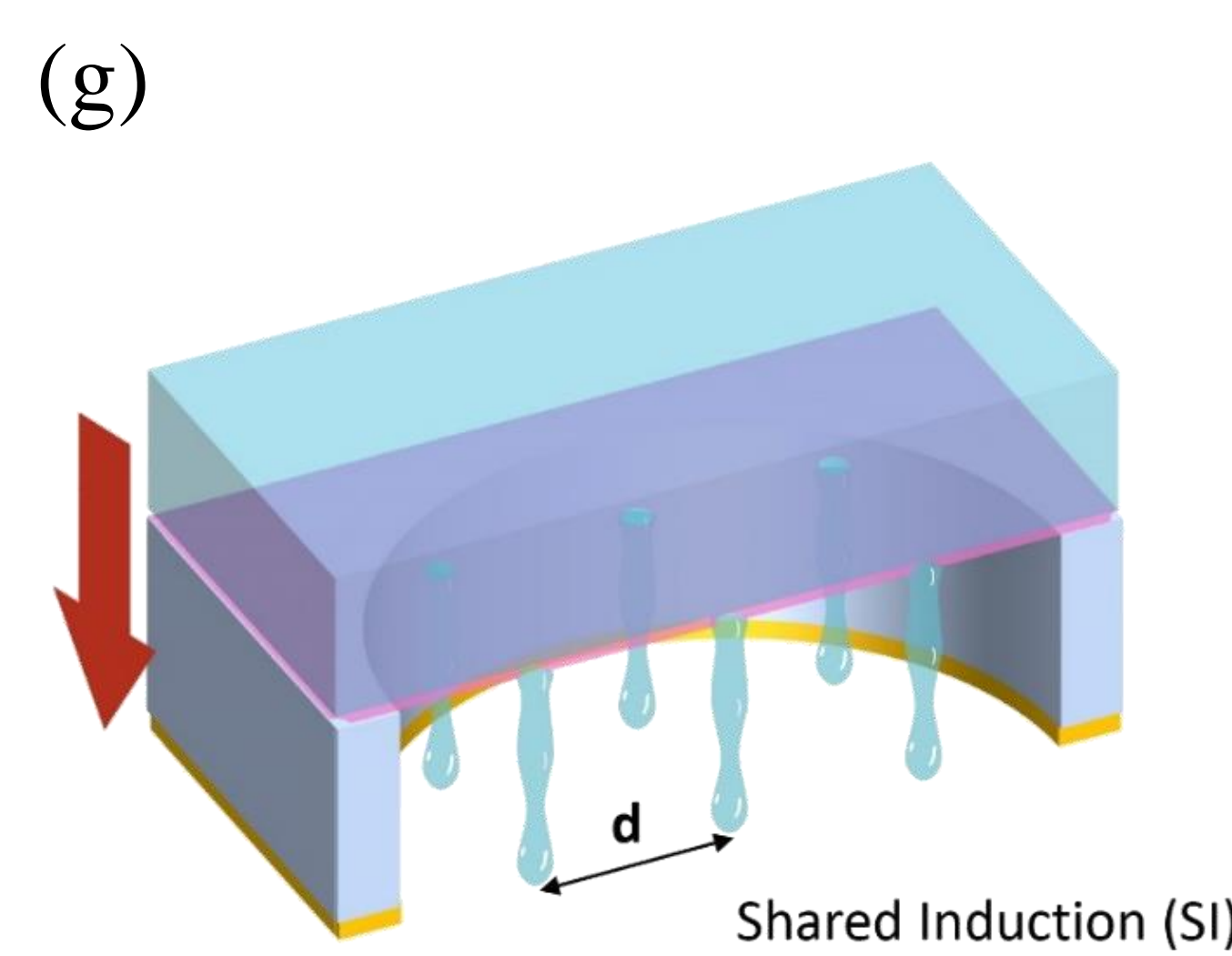
### 3.3 功率密度



(f) 腔室感应系统

腔室感应系统在35%的能量转换效率下, 可得到1.9 mW的电能输出功率。

### 多射流集成体系



(g), (h) 共感应系统

共感应系统(shared induction system, SI)可通过便捷地设计孔密度来提高系统的功率密度。0.4 bar的压强下, SI系统可获得8.4 kW/m<sup>2</sup>的最大功率密度。通过分析静电感应电容和射流间电容, 功率密度将达到84 kW/m<sup>2</sup>的理论极限。

## 4. 结论 Conclusions

- 利用高速运动带电微液滴实验上创造了动电效应近80%效率的新突破
- 在保持近40%的效率下, 靶电势可降低至4 kV以内
- 多孔集成单元在0.4 bar的压强下最高可获得8.4 kW/m<sup>2</sup>功率密度

## 5. 参考 References

- [1] Y.B. Xie, et al. *Nature Communications* 5.4 (2014):3575.
- [2] L. Rayleigh. *Proc. R. Soc. Lond.* 29.196-199 (1879):71-97.
- [3] D.X. Xu, et al. *Cell Reports Physical Science* 1.7 (2020): 100110.