

無電源・永久動作を保証する 帯電型エネルギーハーベスタの最前線

年吉 洋 (東京大学 生産技術研究所)

橋口 原 (静岡大学 電子工学研究所)

藤田博之 (東京大学 生産技術研究所)

Hiroshi Toshiyoshi (IIS, Univ. of Tokyo)

Gen Hashiguchi (Shizuoka University)

Hiroyuki Fujita (IIS, Univ. of Tokyo)

NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラム・先導研究
トリリオンセンサ社会を支える高効率MEMS振動発電デバイスの研究



技術研究組合NMEMS技術研究機構

高効率MEH研究所

研究開発責任者 年吉 洋

業務管理・経理

静岡大学 電子工学研究所
橋口研究室

研究項目A. 固体イオンエレクトレットの形成とエネルギーハーベスタ応用

鷺宮製作所 R & Dセンター

研究項目B. イオン液体技術のエネルギーハーベスタ応用
研究項目C. エネルギーハーベスタの設計、試作および評価（東京大学に再委託）

マイクロマシンセンター

研究項目D. 交通インフラモニタリングでのエネルギーハーベスタ導入研究

ダイキン工業 金岡工場／ソリューション開発センター

研究項目E. オフィス・工場等でのエネルギーハーベスタ導入研究

マイクロマシンセンター
研究項目F. 標準化の戦略立案

再委託

東京大学 生産技術研究所

研究項目Cのうち、電極狭ギャップ化、デバイス試作・評価

コンソーシアム
形成

アドバイザ企業群

- ・ J R 東日本
- ・ NHK 放送技術研究所
- ・ 電力中央研究所

NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラム・先導研究 トリリオンセンサ社会を支える高効率MEMS振動発電デバイスの研究

<http://mirai.la.coocan.jp/meh/>



研究推進委員長：藤田博之

広くきめ細かく環境の情報を集めたり、個人の健康状態をいつも見守ったり、古い橋やトンネルの健全性を常に確認したりするために、無数いたるところに配置し、無線ネットワークで測定データを集めるIoT (Internet of Things) の構想が脚光を浴びています。生体に例えると、感覚器にあたるわけですが、それを常に活動させていくためにはエネルギーの補給が必須です。生き物がエサを食べたり、光合成をしたり、で体温を上げたりするのに相当する、センサへの自律的なエネルギー供給を行うため、身の回りには様々なエネルギー源から発電する方法(電)を開発しなければいけません。環境発電には用途に応じて多くの方式があり、太陽電池、圧電素子などを用いる研究が行われてきました。

我々は主として橋やトンネルの監視用センサを念頭に置き、日夜どこでも使え、エネルギー密度も比較的大きい環境振動からの発電をめざし、研究を進めていきます。低周波の振動から効率よく発電できる静電方式に着目し、エレクトレットの性能の向上とイオン液体による静電容量増大という二つの新規な発想で、発電量を現状の百倍にしたいと考えています。

もちろん、先導研究を将来の国家プロジェクトに育てていくためには、他の環境発電方式(熱電変換、太陽電池)や周辺回路(発電電力回路や蓄電素子)を含む統合システム化と、適用対象の特定と要求仕様の策定をめざす異業種・異分野融合が大切です。このような総合的検討の先鋭的な研究開発を両輪とし、知財戦略や広報活動を補助輪として、将来のプロジェクトの全体構成を定め目標を設定したいと考えています。忌憚ないご意見を頂きながら、建設的な議論をもとに本プロジェクトを推進していきたいと思っておりますので、よろしくご支援ご鞭撻の上げます。



研究開発責任者：年吉 洋

半導体微細加工技術の進歩にともない、かつての大型計算機と同等以上の能力を数ミリ角のチップ内に集積化できる時代になりました。さらに近い将来には、集積回路の3次元化とあいまって、携帯電話の機能を米粒大のチップに集約した超小型無線センサの実現も視野に入ります。しかもエレクトロニクスの生産能力から類推すると、年間1兆個もの無線センサを供給可能です。最近よく耳にする「トリリオン・センサ社会」の議論では、このようなセンサを人類に役立てるさまざまなアプリケーションが考えられています。

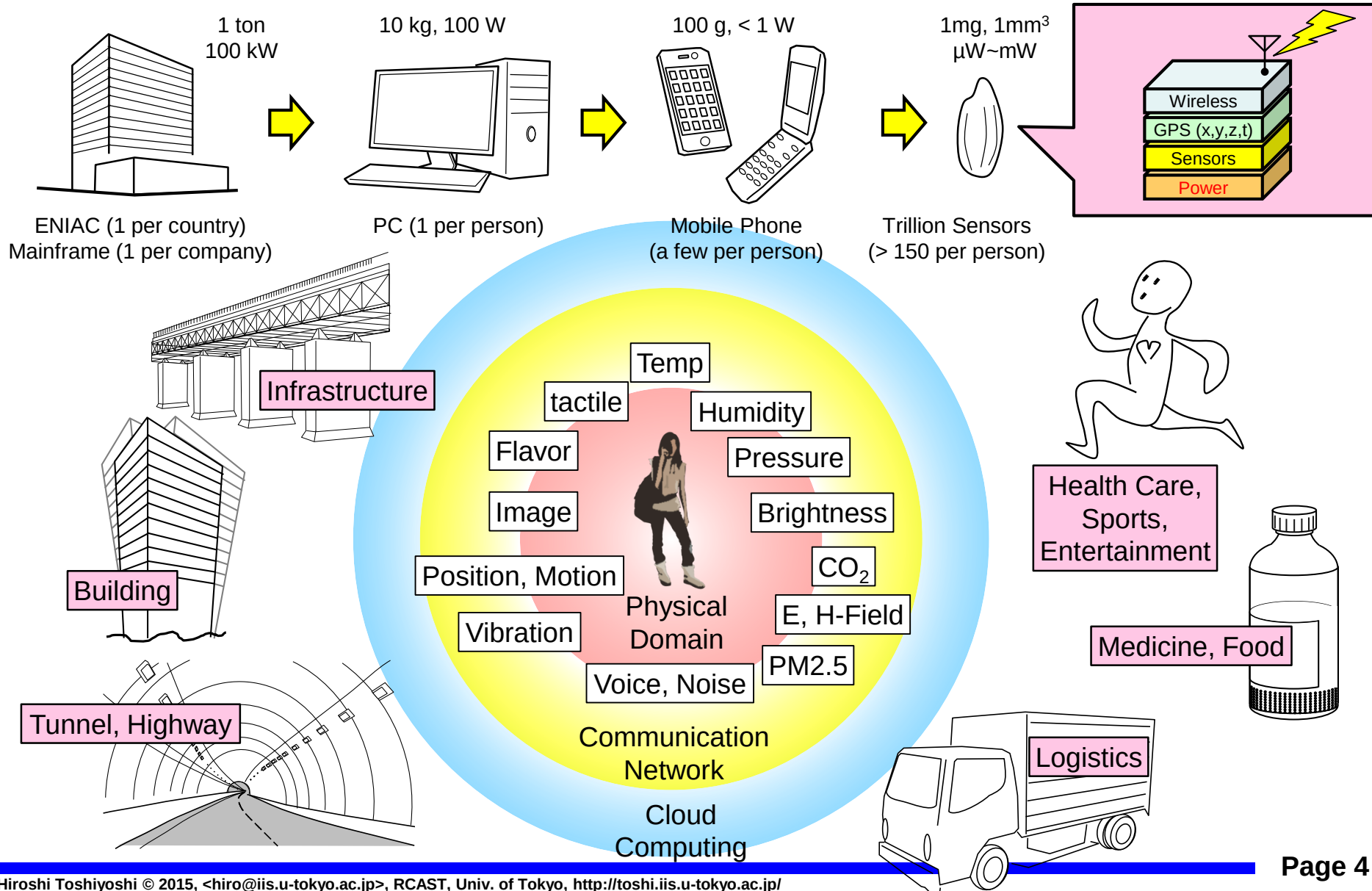
さて1兆個というと、地球上の人口で割ると一人あたり年間150個のセンサを使うことに相当します。これを、2,200平方キロメートルの面積に1,300万人が住む東京都でいうと、最初の1年で、1メートルに1個の密度で無線センサを配置することになります。ただし人が住んでいる場所は限られているので、実際にはさらに高密度になるでしょう。距離1メートルの無線通信はClass 3のBluetooth規格に相当しますので、1mWの電力を供給できれば、米粒大のセンサによるネットワークの実現は不可能ではありません。

我々のプロジェクトでは、身の回りの未利用エネルギーのなかでも特にエネルギー密度の高い環境振動から電力を回収する「高効率MEMS振動発電デバイス」の研究開発を実施します。また中期ビジョンとして、東京オリンピックが開催される2020年にむけて、10mW級の振動発電素子を実現するための基盤技術を構築します。

本プロジェクトの実施体制を構築するにあたり、材料技術、プロセス技術、デバイス設計技術、システム設計技術、さらに、アプリケーション技術など、各技術レイヤーの第一線で活躍するプレイヤーを集めました。小生、研究開発責任者として、彼らが十二分に能力を発揮できるチーム運営を心がけて参ります。ご支援、ご鞭撻を賜りますよう、お願い申し上げます。

Most Important Element in Trillion Sensor Network

Independent Energy Source



Trillion Sensor Density

Tokyo State

Area Total: 2,200 km²

Population: 13 Million

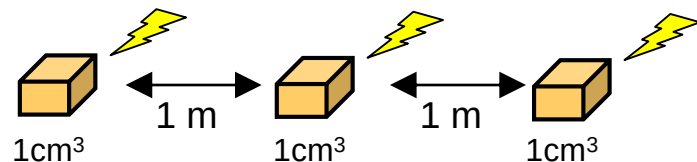
→ Sensors = 13M x 150 = 2 Billion / year

→ Average Spacing = 1 m

10 mW x 1 Trillion (Simultaneously)

→ 1000 万kW (10M kW)

→ Equiv. to 10 Nuclear Power Stations / Year / Earth



Bluetooth Class-3 (1mW)

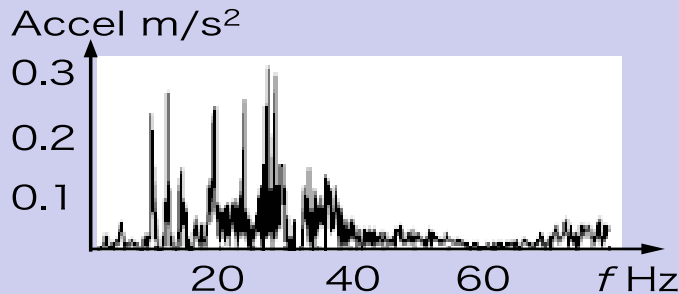
Functions Needed

- Energy Harvester-type Power Supply
- Sensing
- Time & Location by GPS
- Wireless Signal-out

Energy Resource for Power Harvesting

Type	Environmental Vibration			Sun Light	Heat	EM Wave	Wind
	Electro static (This Work)	Piezo electric	Electro magnetic				
Energy Density W/cm ²	Medium Scale 10 ⁻³			Medium~Large 10 ⁻⁴ 10 ⁻¹	Small 10 ⁻⁵ (@RT)	Small 10 ⁻⁶	Medium 10 ⁻³
Use in Dark Place	Possible			No	Possible	Possible	Possible
Packaging Compatibility	Possible (Hermetic Seal)			No (Window Needed)	Possible (Hermetic Seal)	Possible (Hermetic Seal)	No (Contamination)
Assembly Needed?	No Monolithic	No Monolithic	Yes Magnet	No Monolithic	Yes Pertier	Yes Coil	Yes Vibration Plate
Frequency	Low-High	High	High	---	---	---	---
Memo	Flexibility in frequency design	Low voltage output in low frequency	Low Freq $f_0 = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{k}{m}}$ Soft 				

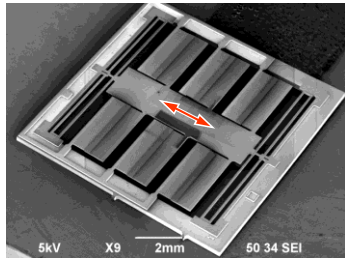
Compatibility with Low Frequency Vibration



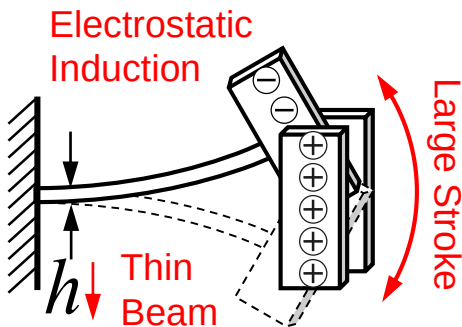
Low Freq. $\downarrow$ $f_0 = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{k}{m}}$ $\downarrow$ Soft Spring $\downarrow$ Large Mass?

Small Acceleration $\downarrow$ $F = m \uparrow \times a \downarrow$ Large Mass?

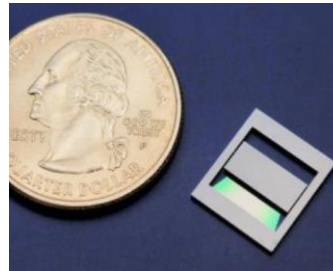
Electrostatic



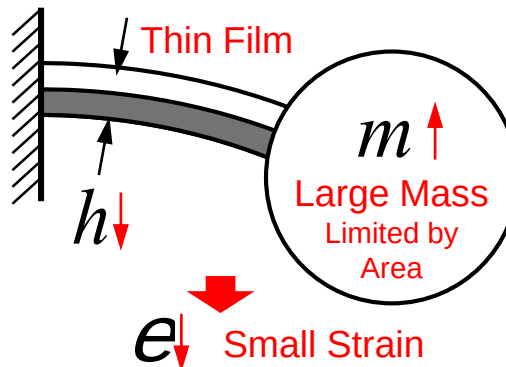
G. Hashiguchi
Shizuoka Univ.



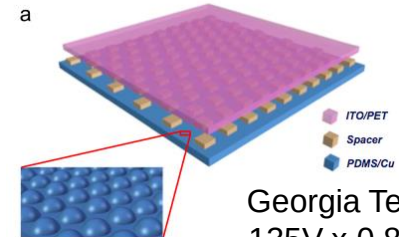
Piezoelectric



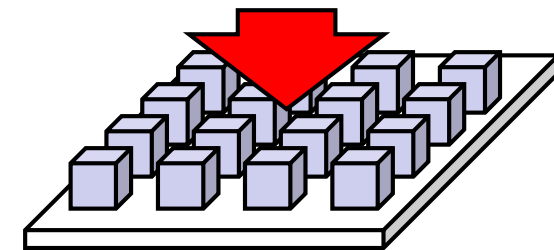
MicroGen System
50 μ W, 15V
100Hz, 0.1G
 $\Delta f < 2$ Hz
15 mm x 15 mm



Triboelectric

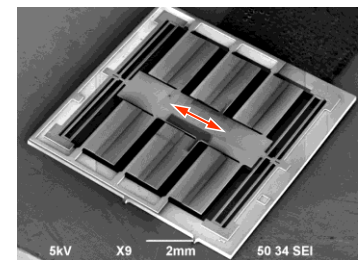
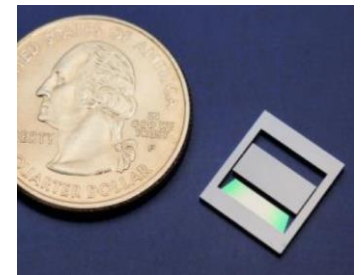
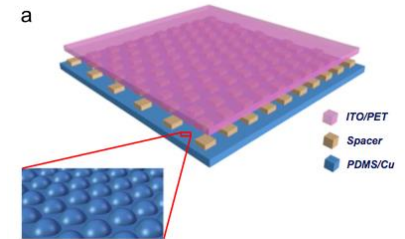
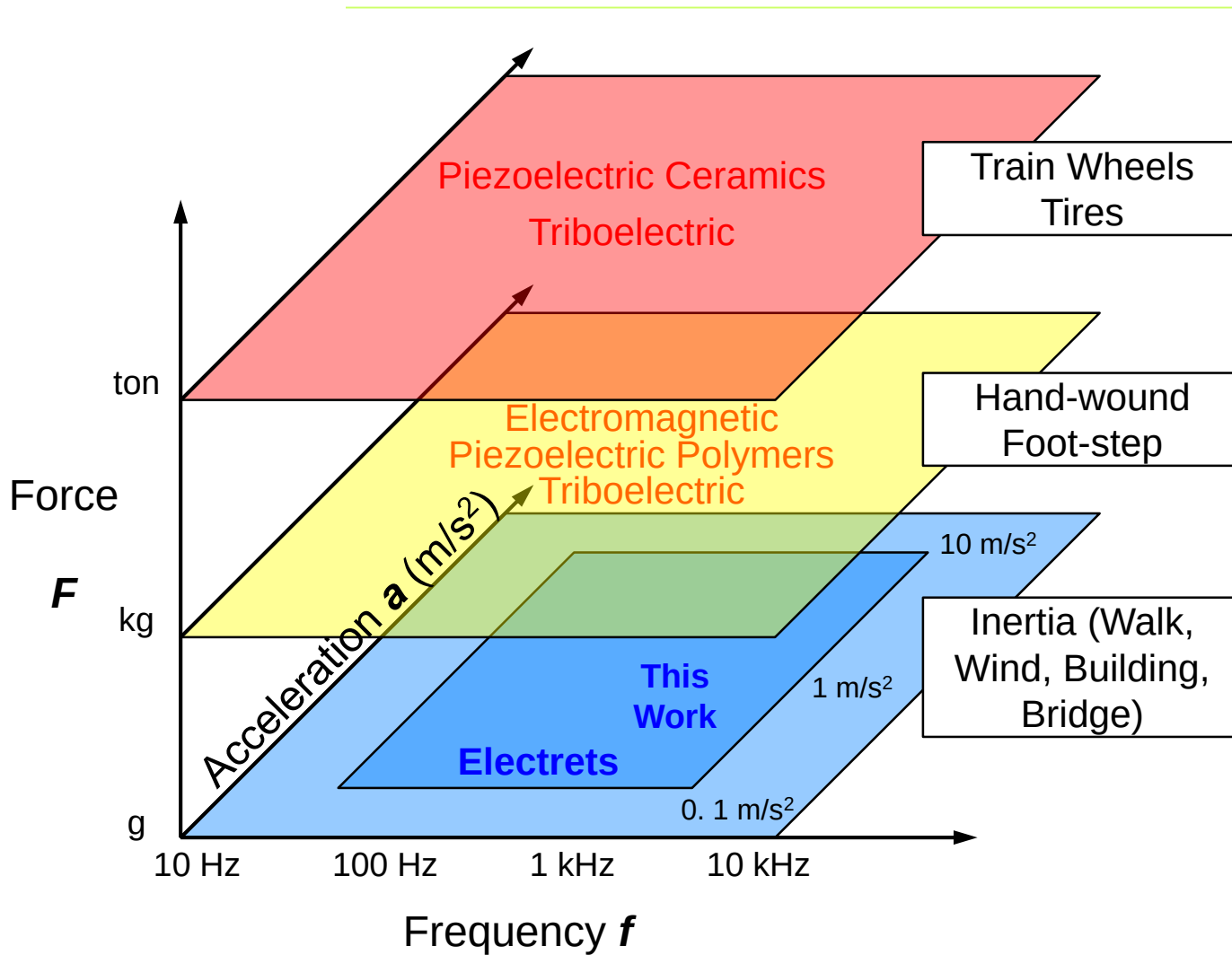


Georgia Tech. Inst.
135V x 0.8 μ A/cm²



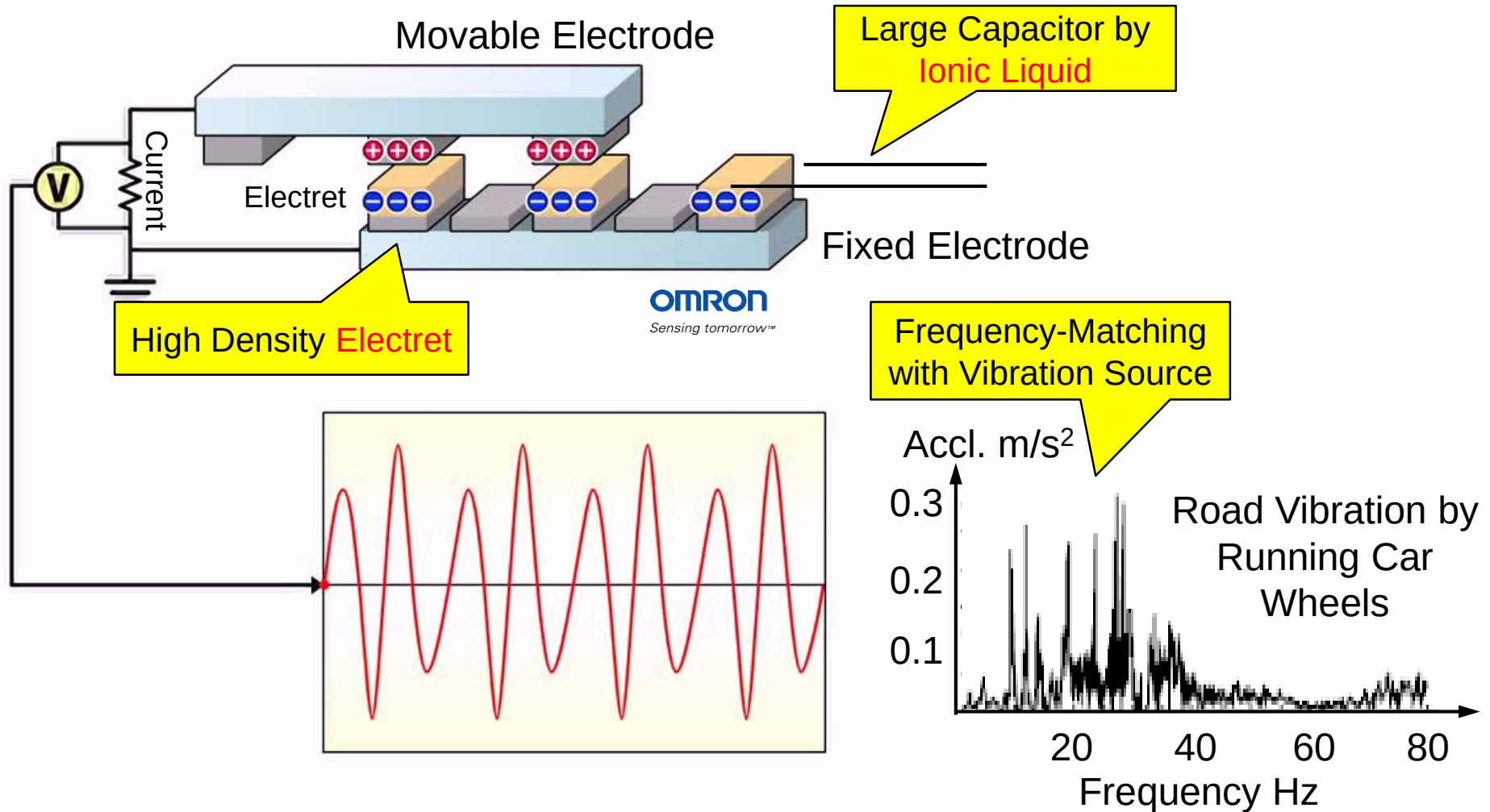
PDMS $E = 1.5$ MPa
 $\varepsilon = 10\% \rightarrow 1.5$ kg/cm²

Specialty Areas for Vibrational Energy Harvesters

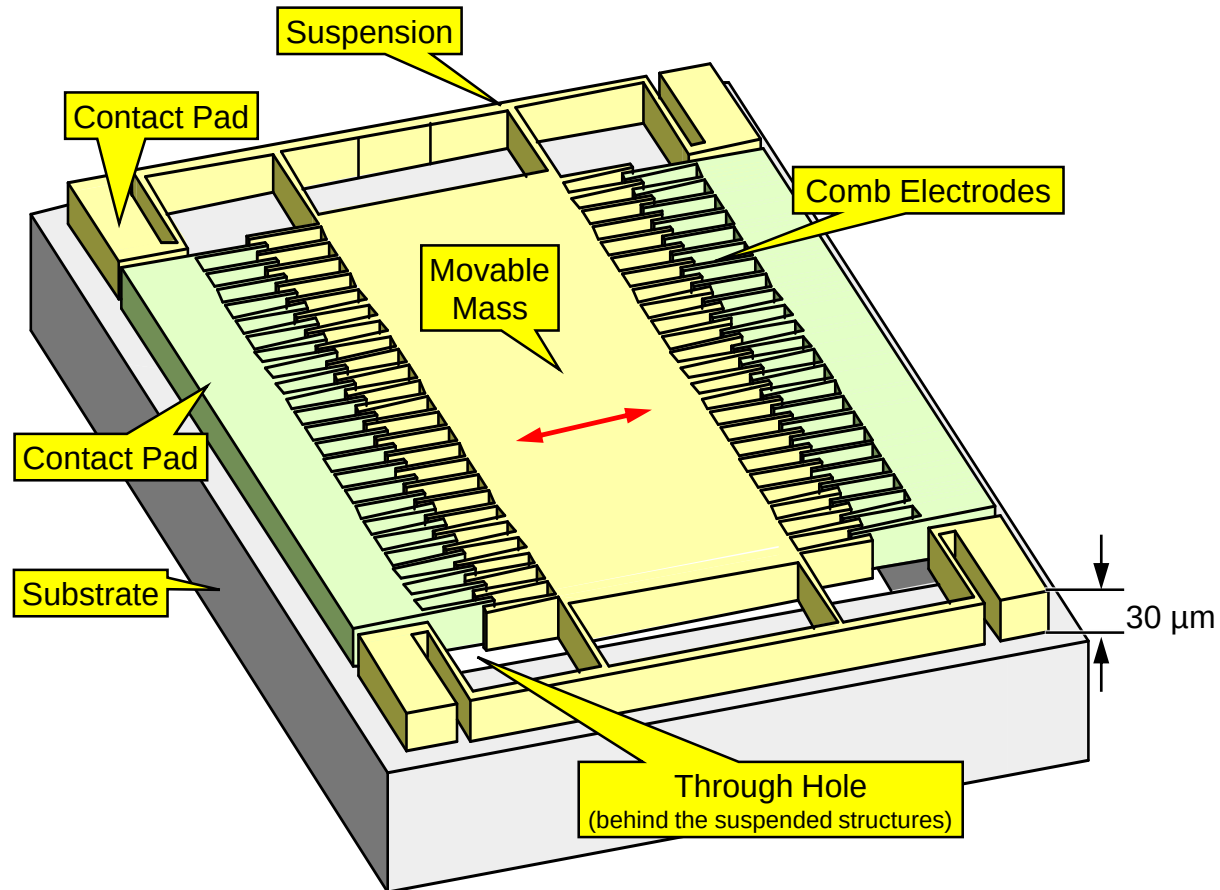


Device Principle of Electret Energy Harvester

Electrostatically Induced Charge

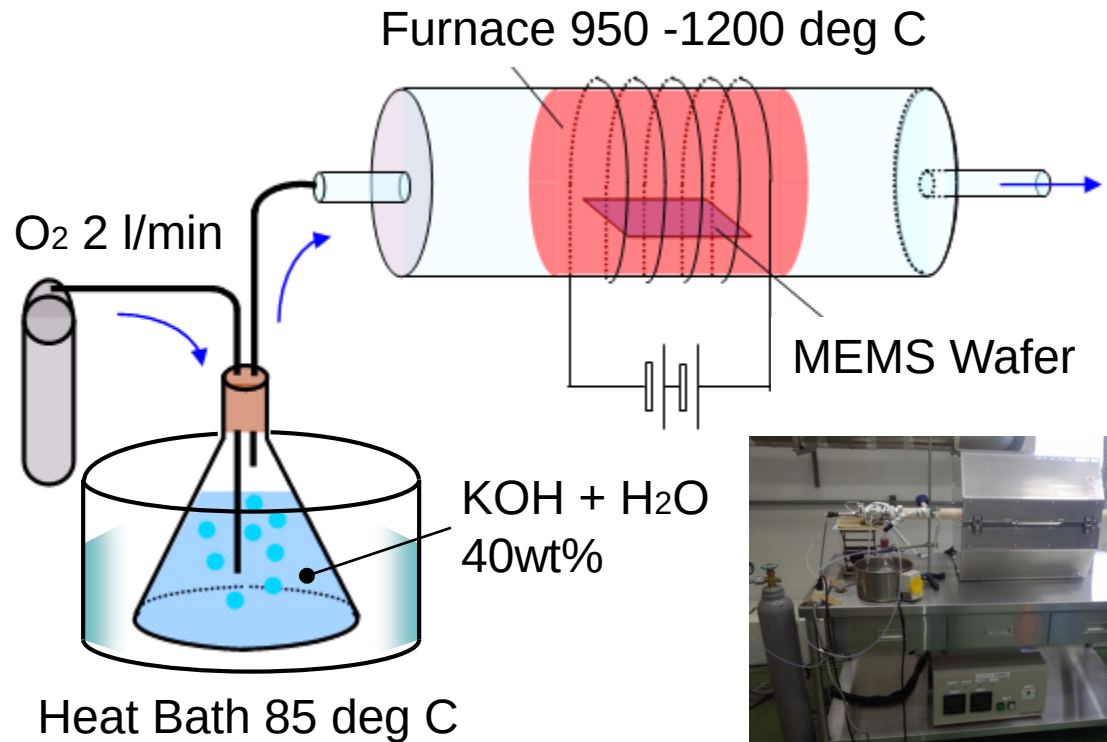
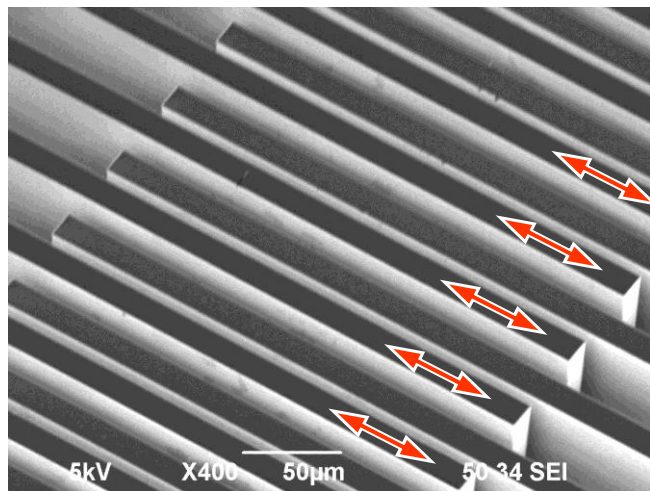
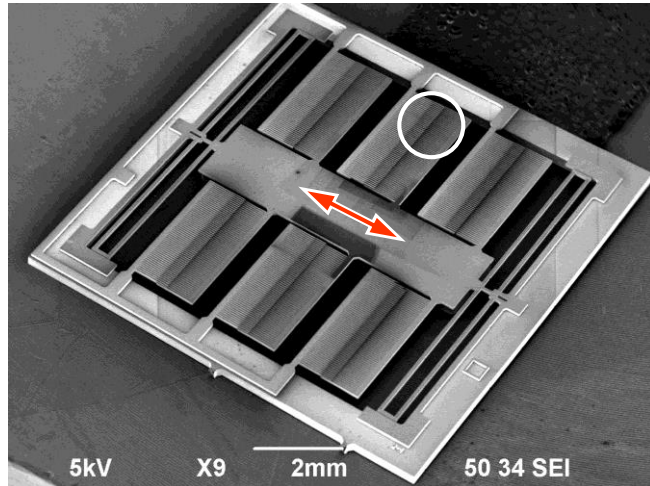


Simplified Structure of Comb-Electret Vibrator



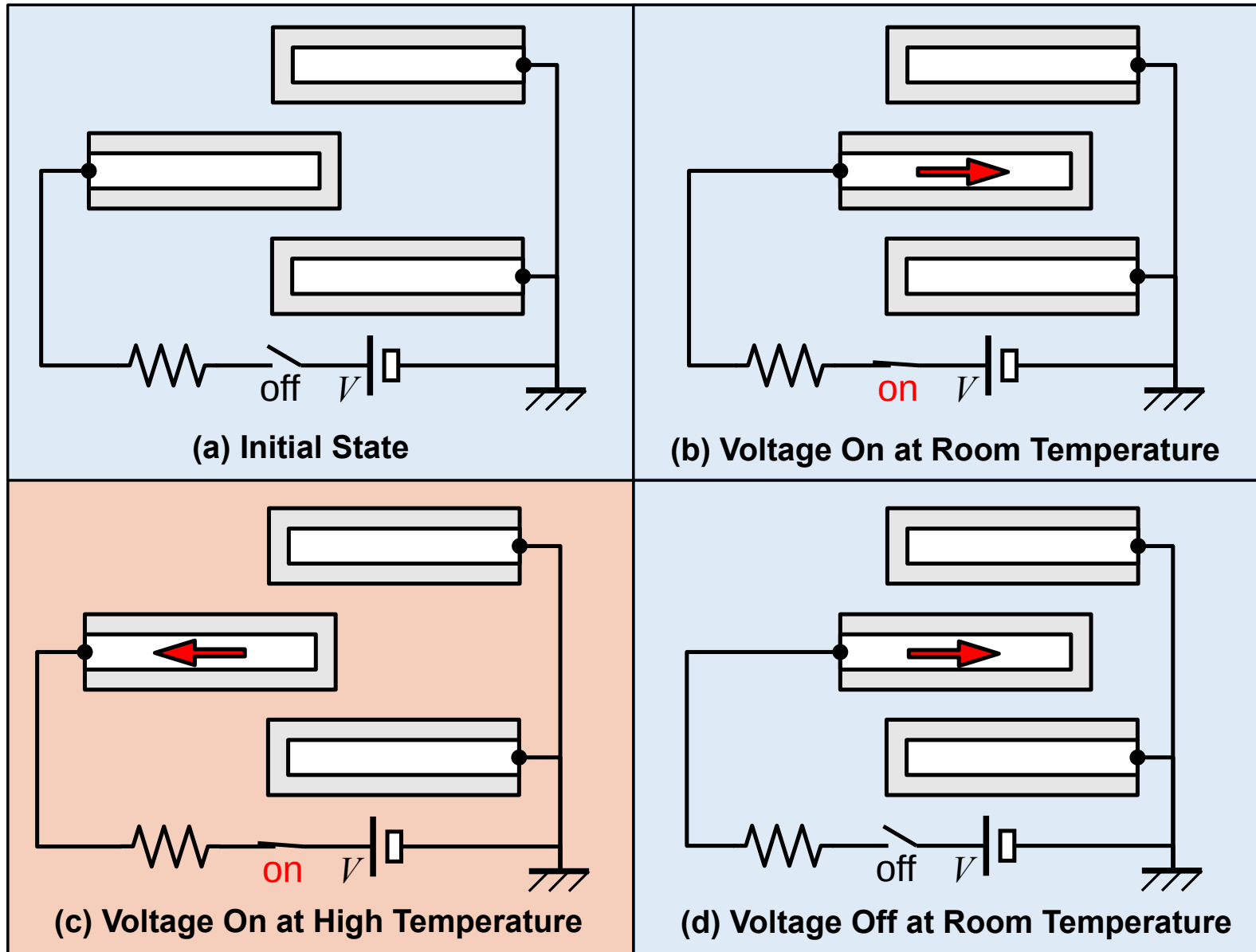
MEMS Electret Energy Harvester

Polarization by Doped Potassium Ions (K^+)



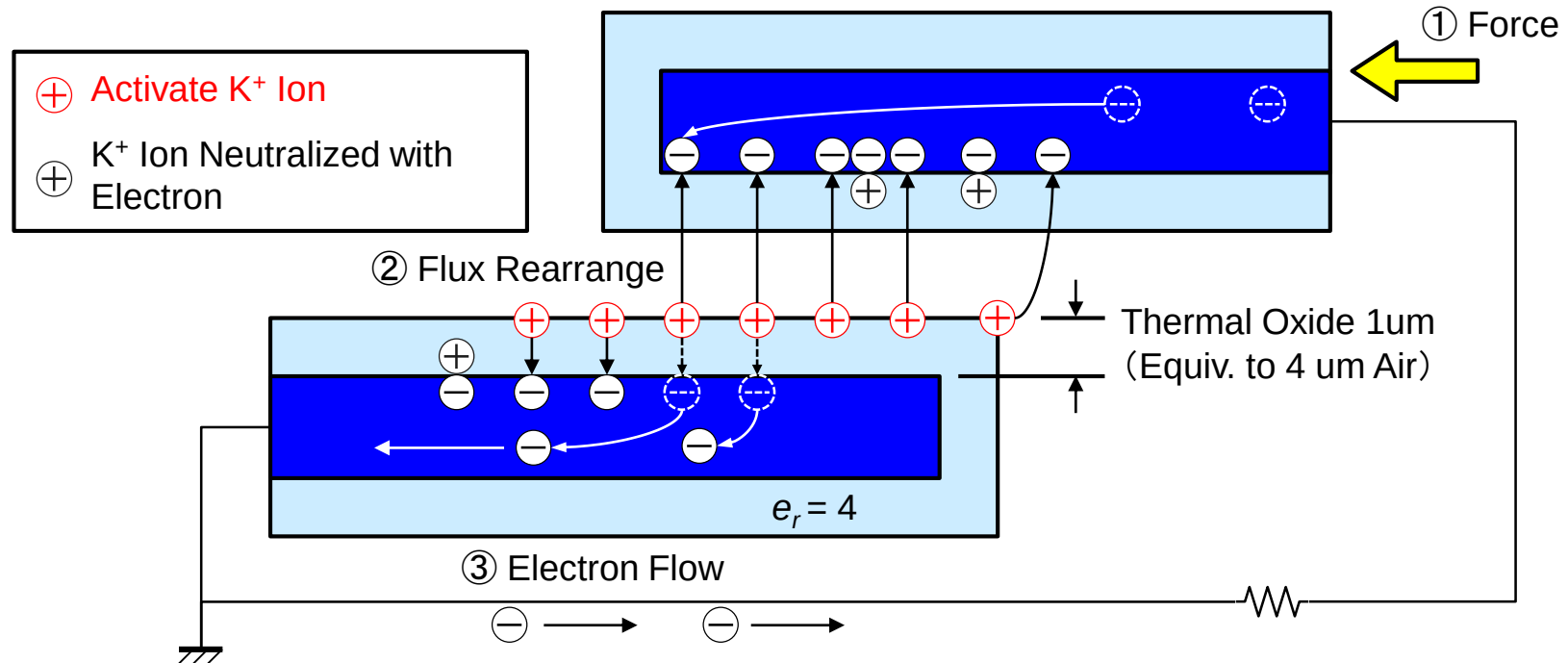
M. Suzuki, H. Hayashi, A. Mori, T. Sugiyama, and G. Hashiguchi 2012

Bias-Temperature Process for Polarization

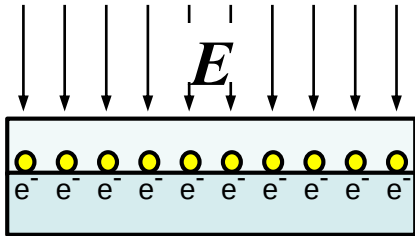
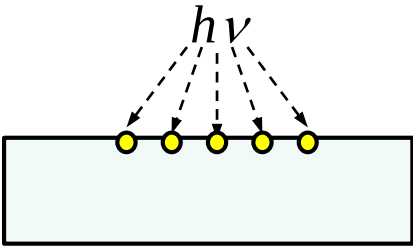
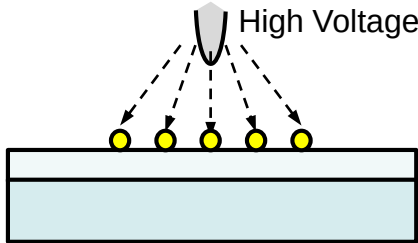


MEMS Electret Energy Harvester

Biased-Temperature (BT) Polarization Process

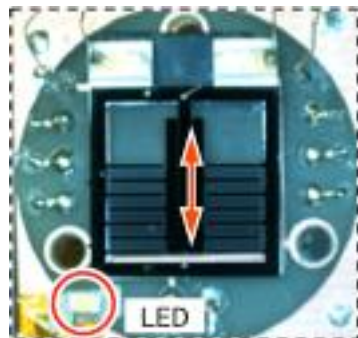
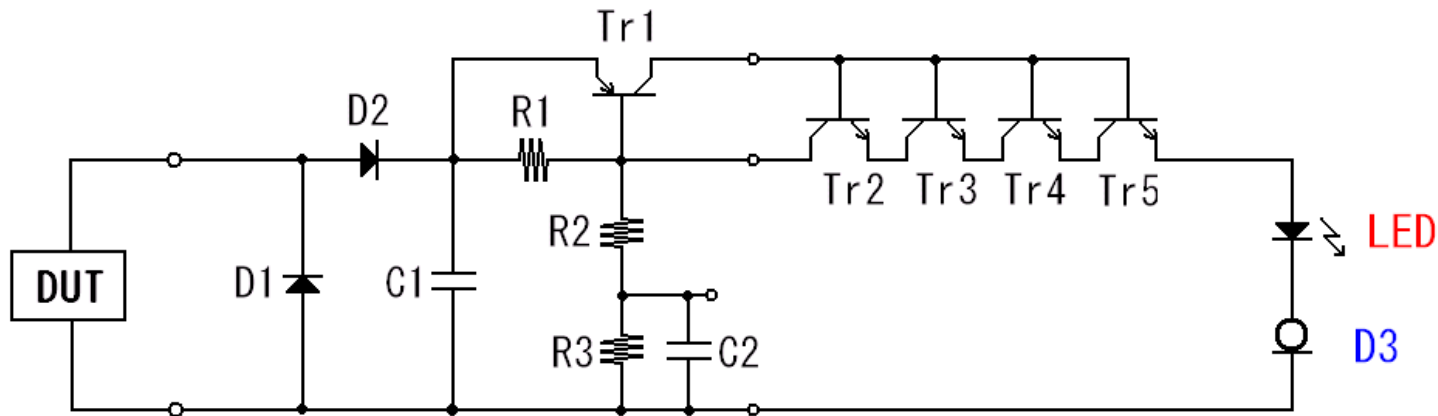
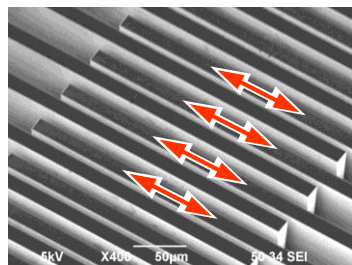


Comparison of Electret Processes

Electret Type	Solid Ion (This Work)	Soft X-Ray	Corona Discharge
Principle	 Polarization	 Electron Strip	 Charge Injection, Absorption
Charge Density	10 mC /m ²	0.1~1 mC /m ²	0.1~1 mC /m ²
Electret on Side Wall	Yes	Partly Yes Near the top surfaces	Partly Yes For wide gap only
Compatibility with Nano gap	Good	Medium Organic film needed on side wall	Difficult No discharge in narrow gap
Manufacturing Cost	Low High throughput	Expensive X-ray source	Medium
Wafer-wise Uniformity	Good Thermal oxide < 1%	Difficult Film coating dependent	Difficult Discharge distribution
Electret Density Design	Flexible Location and voltage controllable	Medium	Difficult(?) Wafer-wise process
Compatibility with MEMS Process	Good Hermetic sealed	Good Hermetic sealed	Difficult Assembly needed

LED Operation by Electret Energy Harvester

Continuous 1 μW , Impulse 100 μW



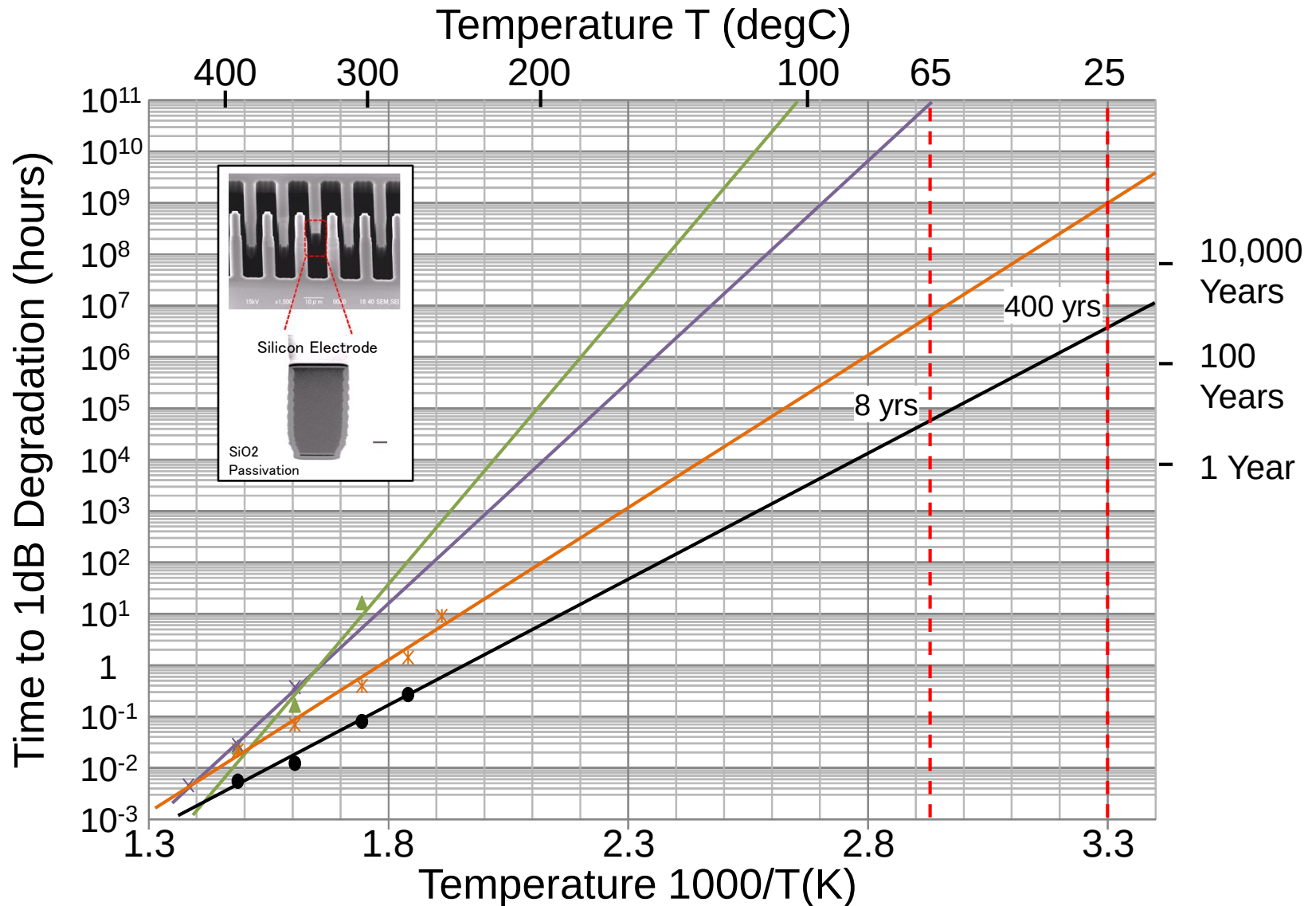
Shaker
100 Hz – 1 kHz
@1 m/s²



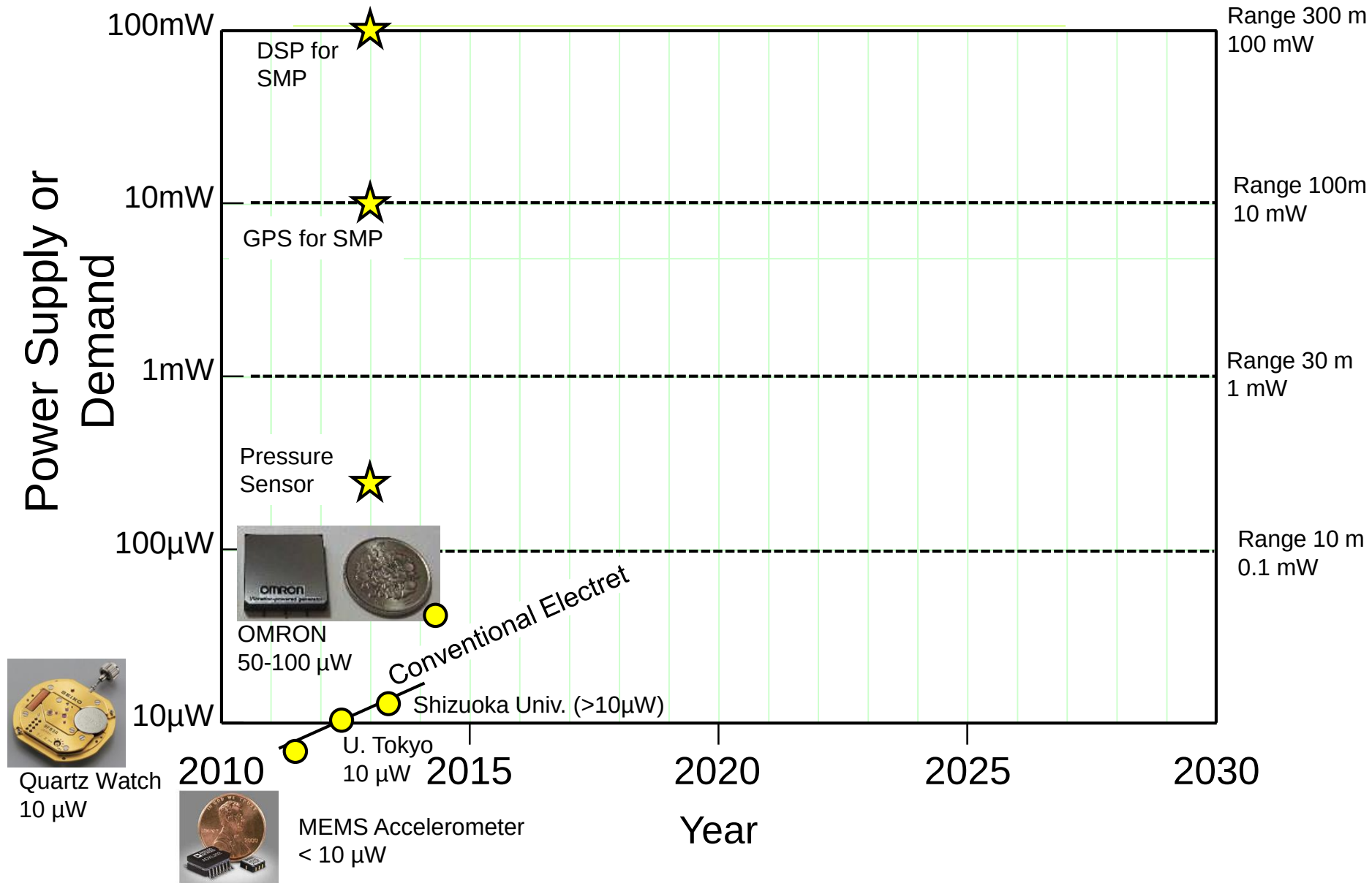
M. Suzuki, H. Hayashi, A. Mori, T. Sugiyama, and G. Hashiguchi 2012

Lifetime of Electret (K^+ in SiO_2)

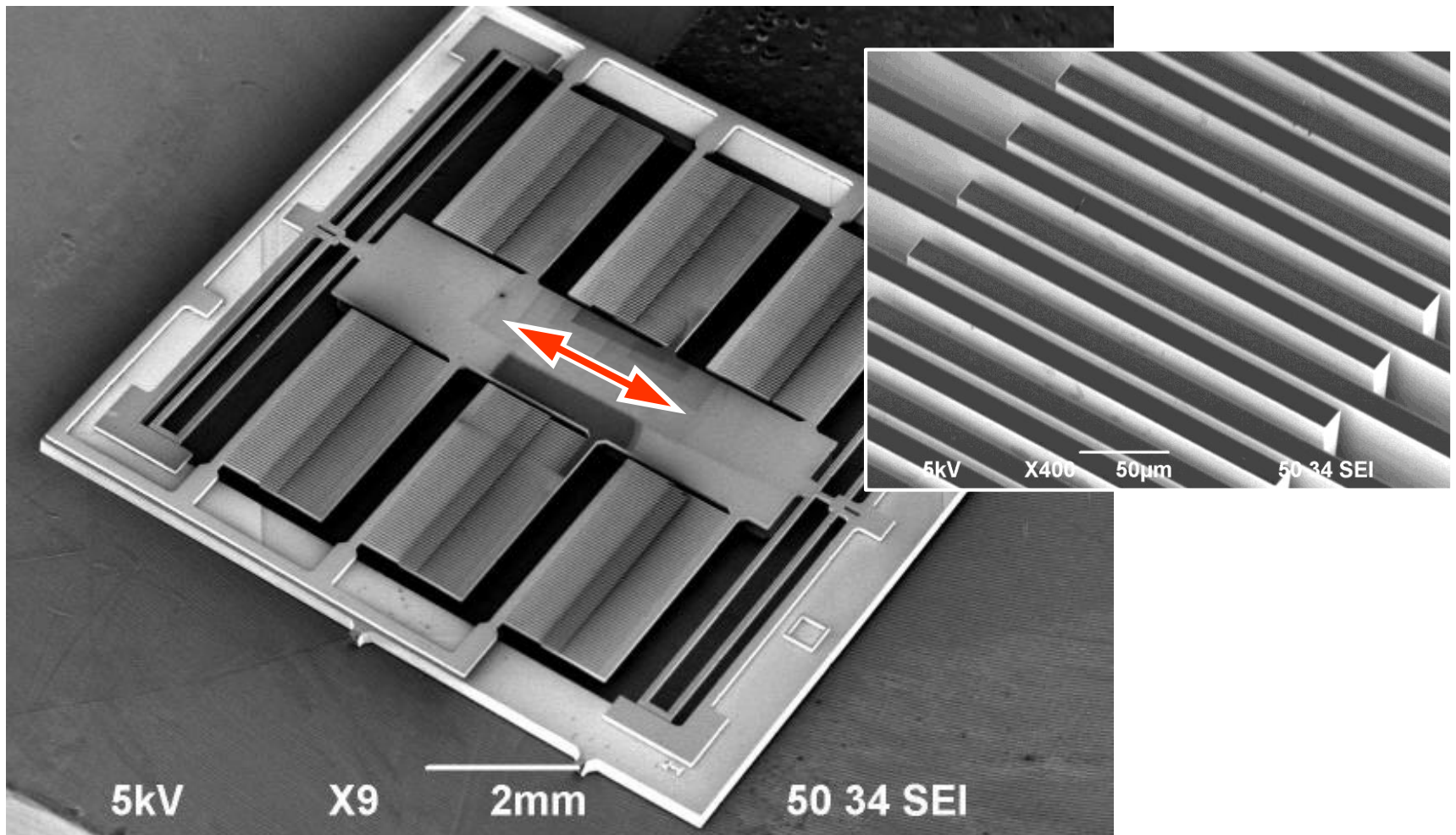
Accelerated Test, Defined by 1 dB Drop



Demand-Supply Curves for Energy Harvesters



MEMS Energy Harvester with Electret Combs



M. Suzuki, H. Hayashi, A. Mori, T. Sugiyama, and G. Hashiguchi 2012

Electret Power Generation by Comb-Electrodes

SOI Height

DRIE Rate

$$H_{\text{SOI}} \Big|_{\text{Const Cost}} \propto R_{\text{DRIE}}$$

Electrode Width (Top)

Width (Bottom)

$$W_{\text{ELEC}} = 2H_{\text{SOI}} \sin(q - p/2) + W_{\text{CORE}}$$

Verticalness

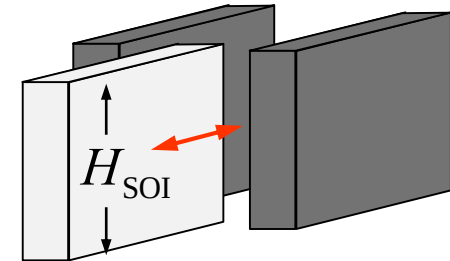
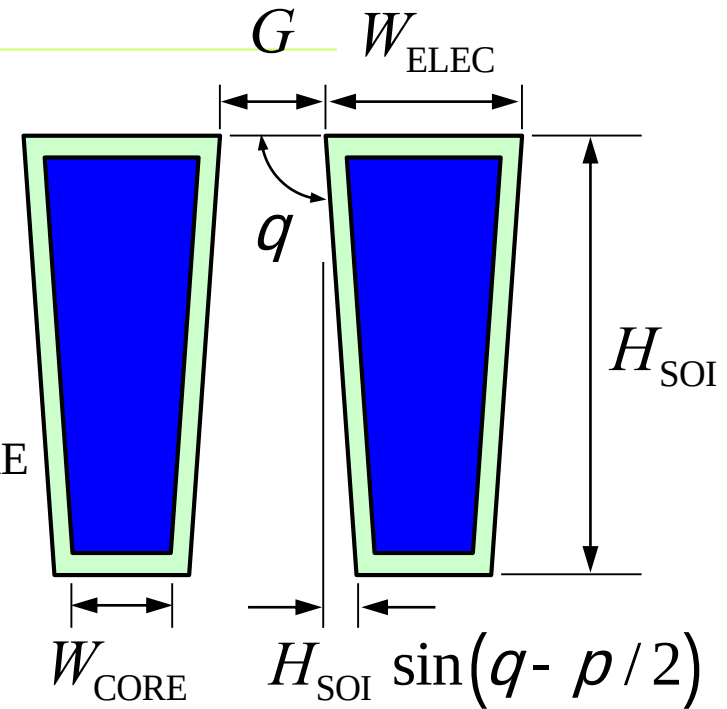
Number of Electrodes

$$N \propto \frac{1}{G + W_{\text{ELEC}}}$$

Gap

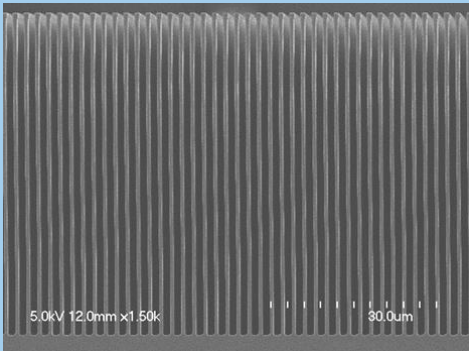
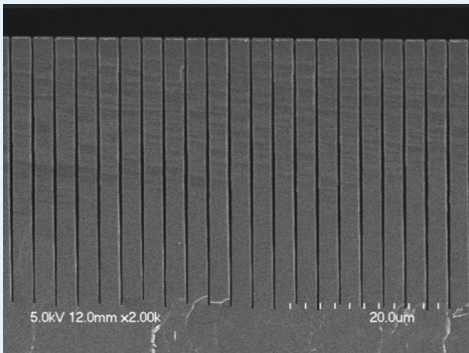
Output Power in Given Device Area

$$P \propto \frac{N \times H_{\text{SOI}}}{G} \propto \frac{H_{\text{SOI}}}{\{G + 2H_{\text{SOI}} \sin(q - p/2) + W_{\text{CORE}}\} \times G}$$



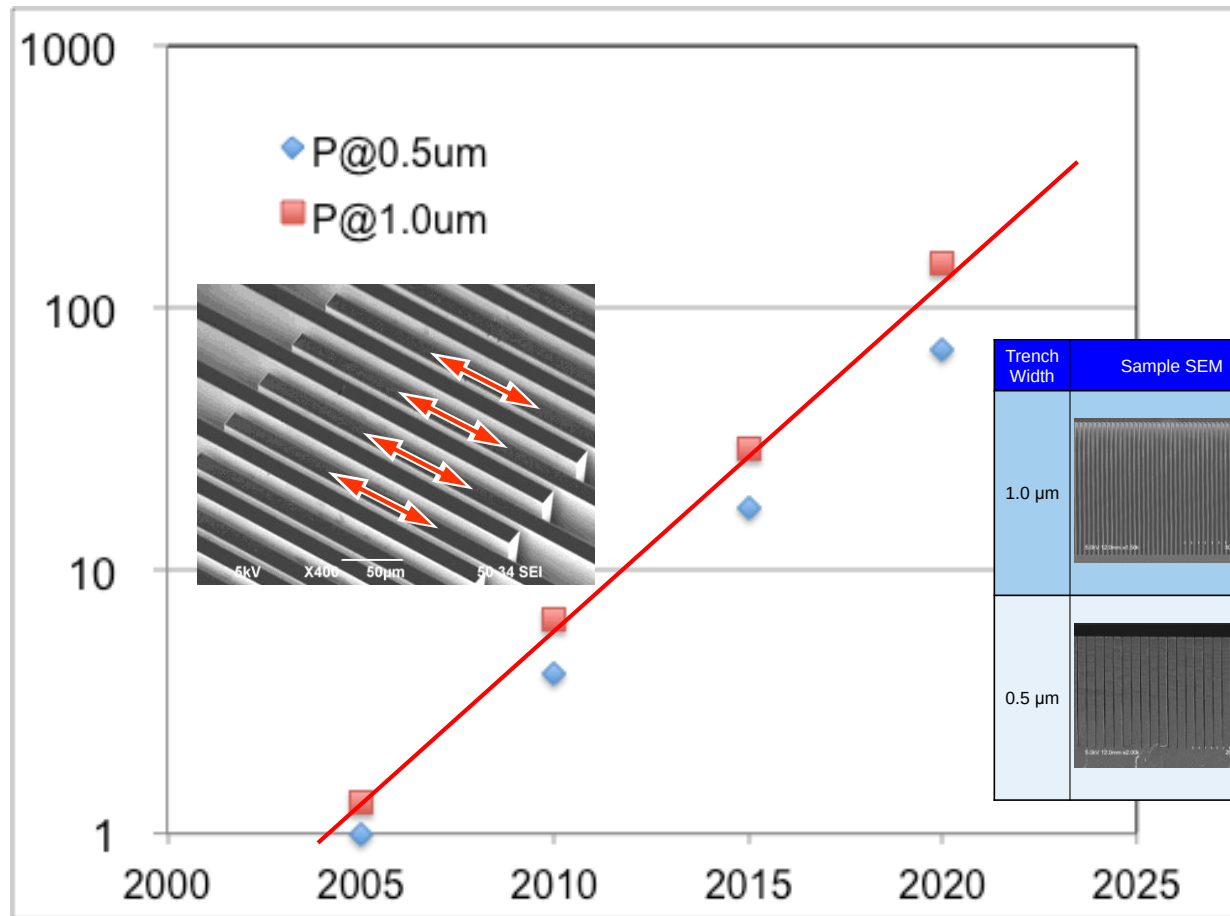
DRIE Roadmap

Data Courtesy: SPP Technologies Co., Ltd

Trench Width	Sample SEM	Parameter	2010	2015	2020
1.0 μm		Depth	50 μm	100 μm	130 μm
		Aspect Ratio	50	100	130
		Etch Rate	> 2.0 $\mu\text{m}/\text{min}$	> 1.2 $\mu\text{m}/\text{min}$	> 1.0 $\mu\text{m}/\text{min}$
		Angle	$90 \pm 0.2^\circ$	$90 \pm 0.2^\circ$	$90 \pm 0.2^\circ$
0.5 μm		Depth	30 μm	60 μm	75 μm
		Aspect Ratio	30	120	150
		Etch Rate	> 0.8 $\mu\text{m}/\text{min}$	> 0.7 $\mu\text{m}/\text{min}$	> 0.6 $\mu\text{m}/\text{min}$
		Angle	$90 \pm 0.2^\circ$	$90 \pm 0.2^\circ$	$90 \pm 0.2^\circ$

Estimation of Power Generation Growth (Over 2005)

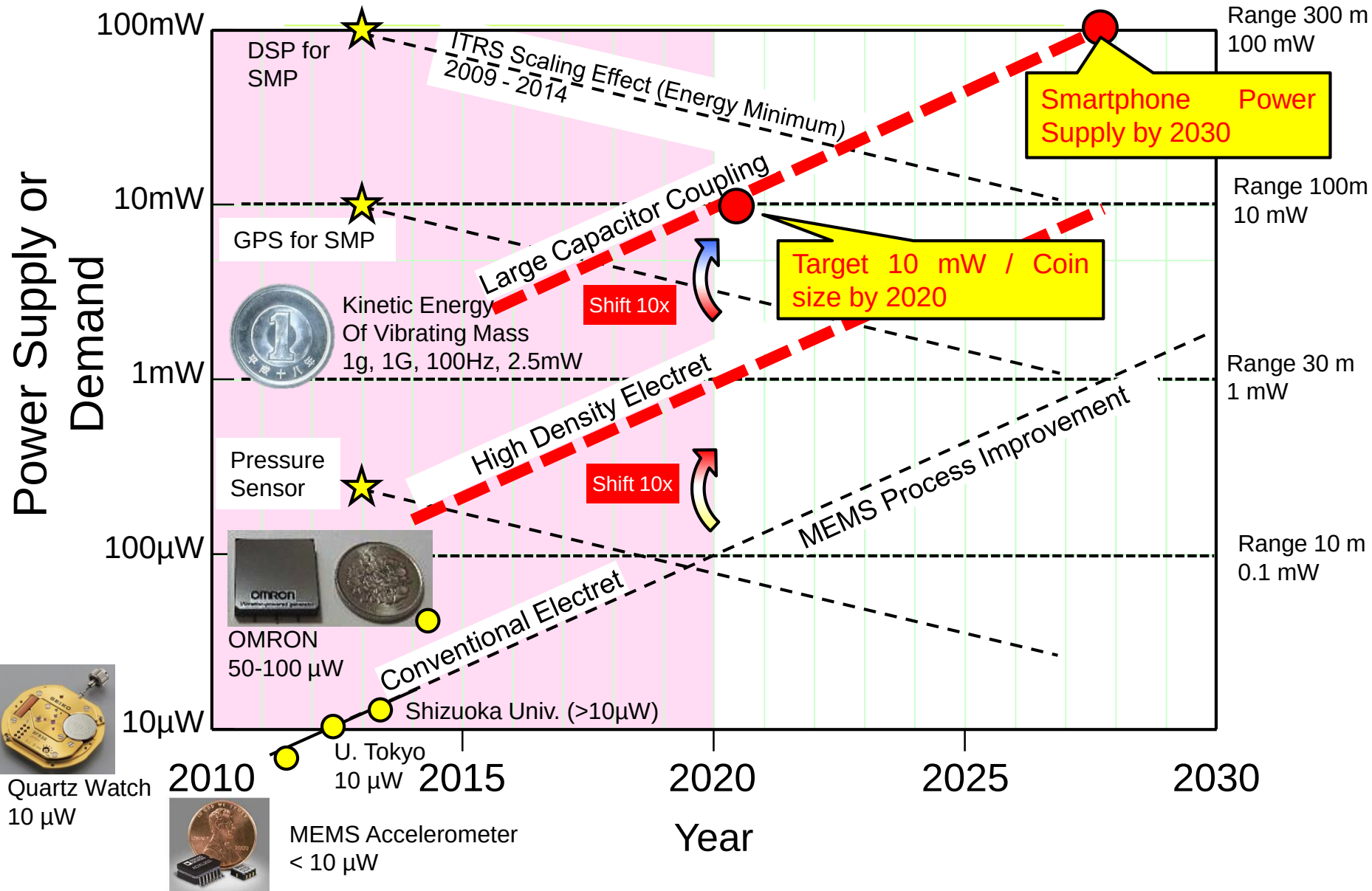
Growth 100x in 15 years (2005 → 2020)



SPT

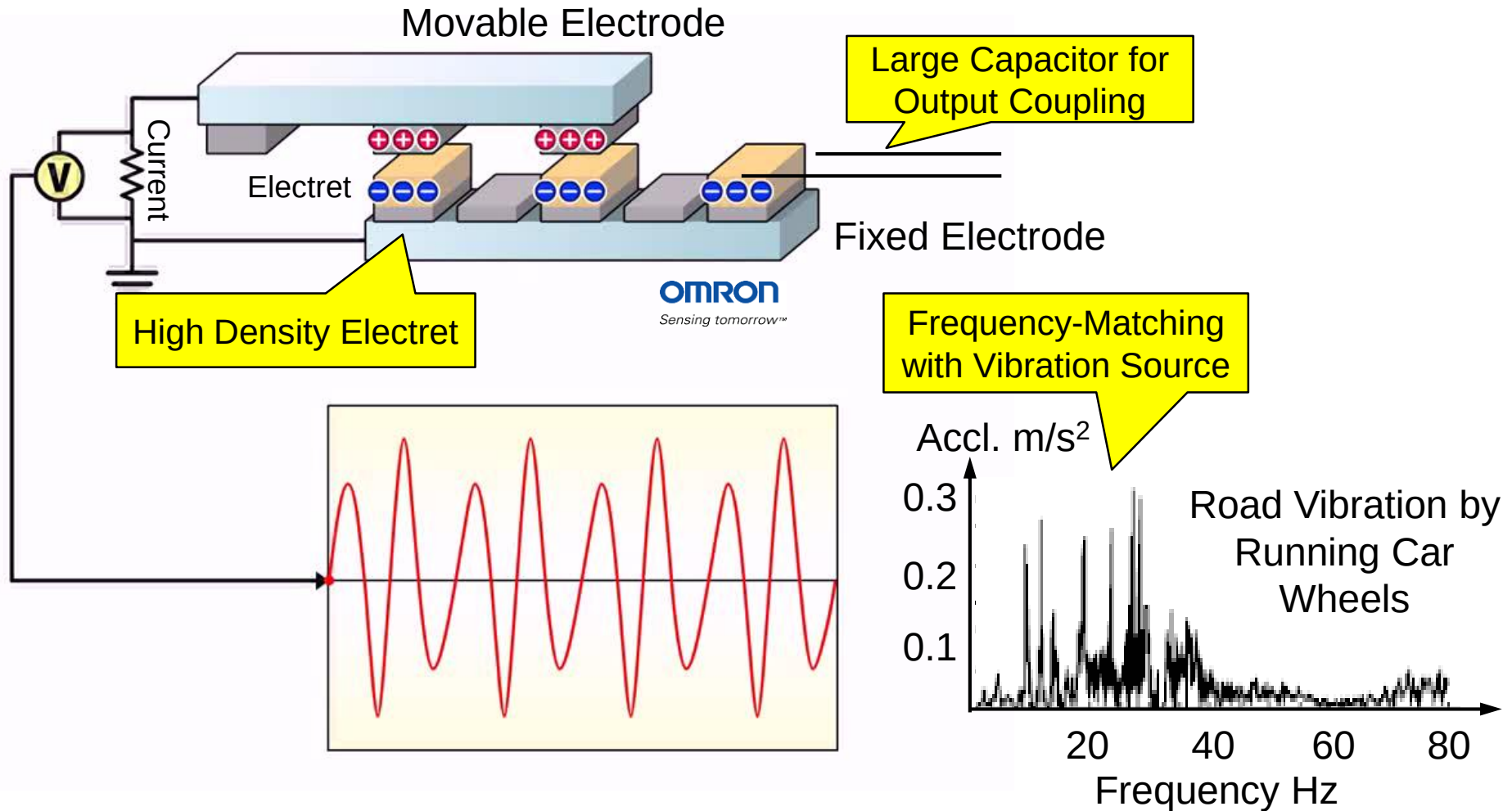
$$P \mu \frac{H_{\text{SOI}}}{\{G + 2H_{\text{SOI}} \sin(q - p/2) + W_{\text{CORE}}\} \times G}$$

Demand-Supply Curves for Energy Harvesters



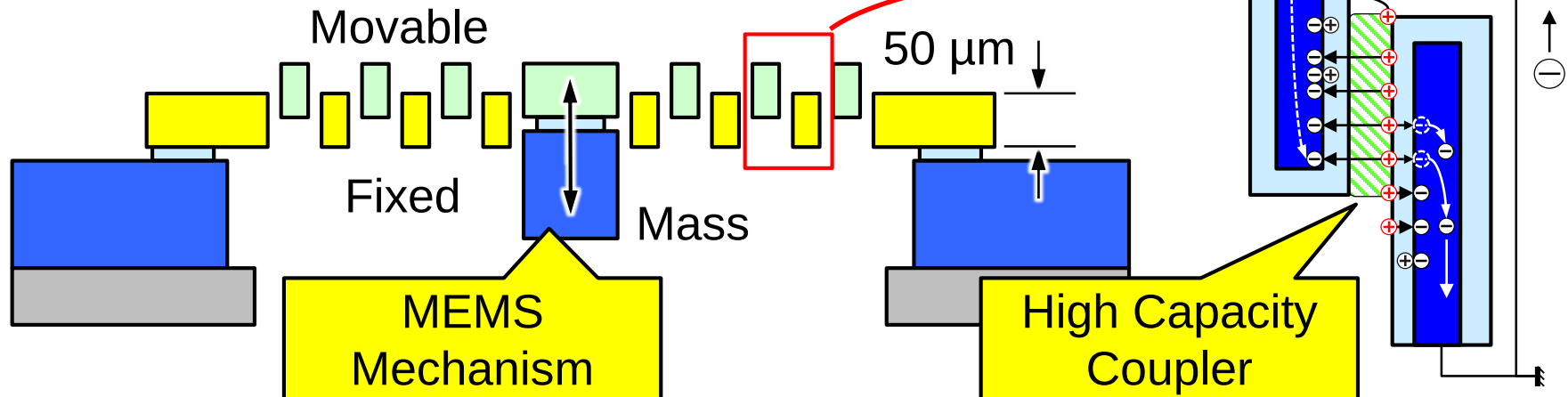
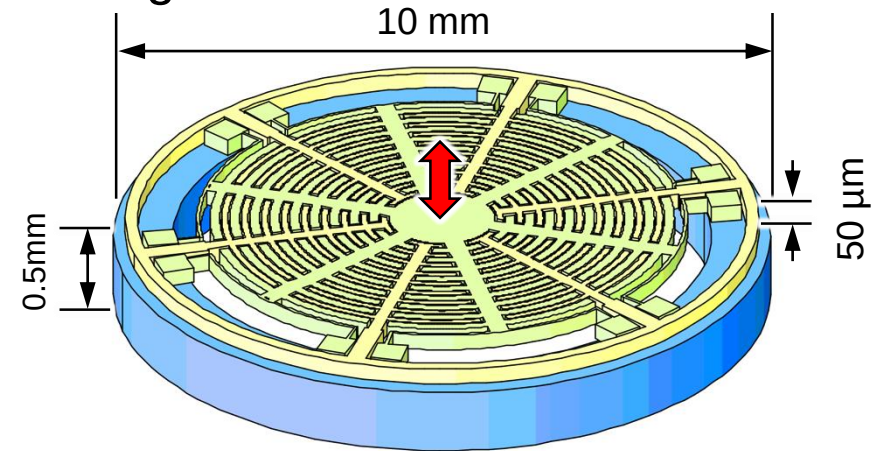
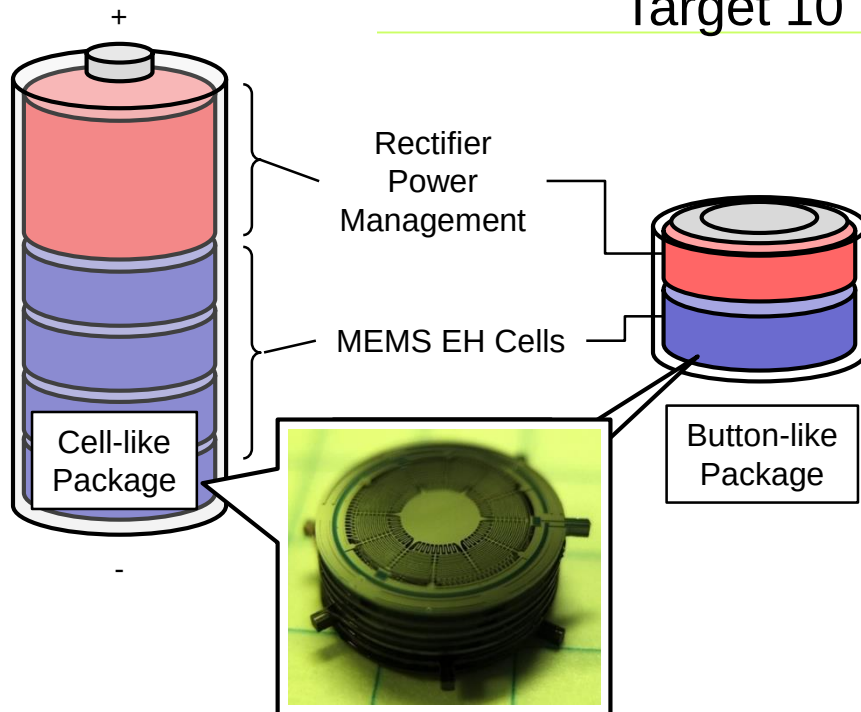
Device Principle of Electret Energy Harvester

Electrostatically Induced Charge



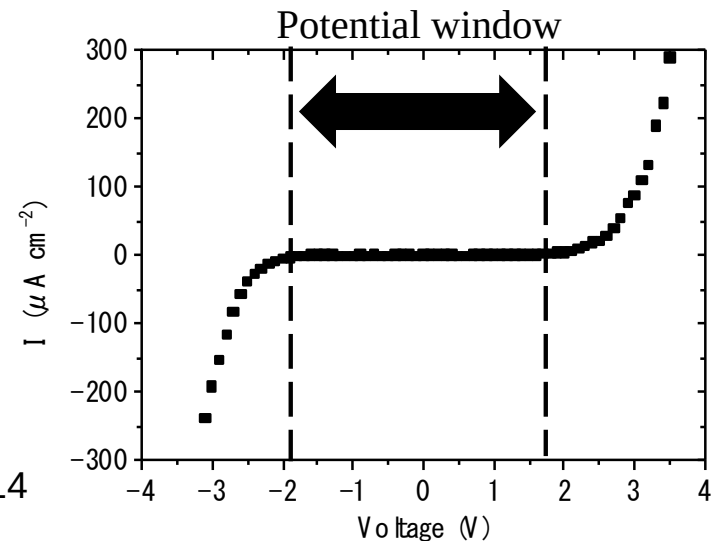
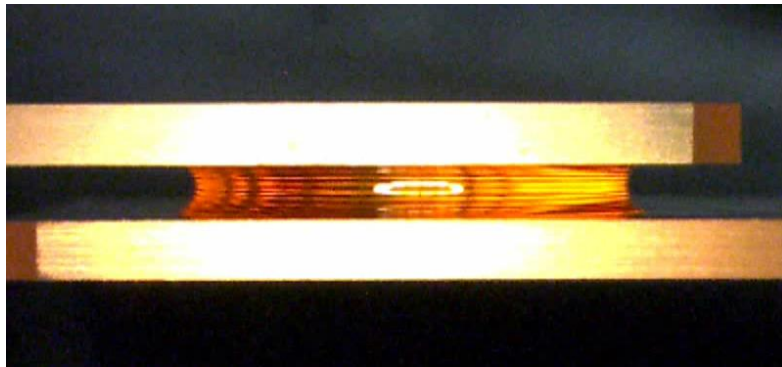
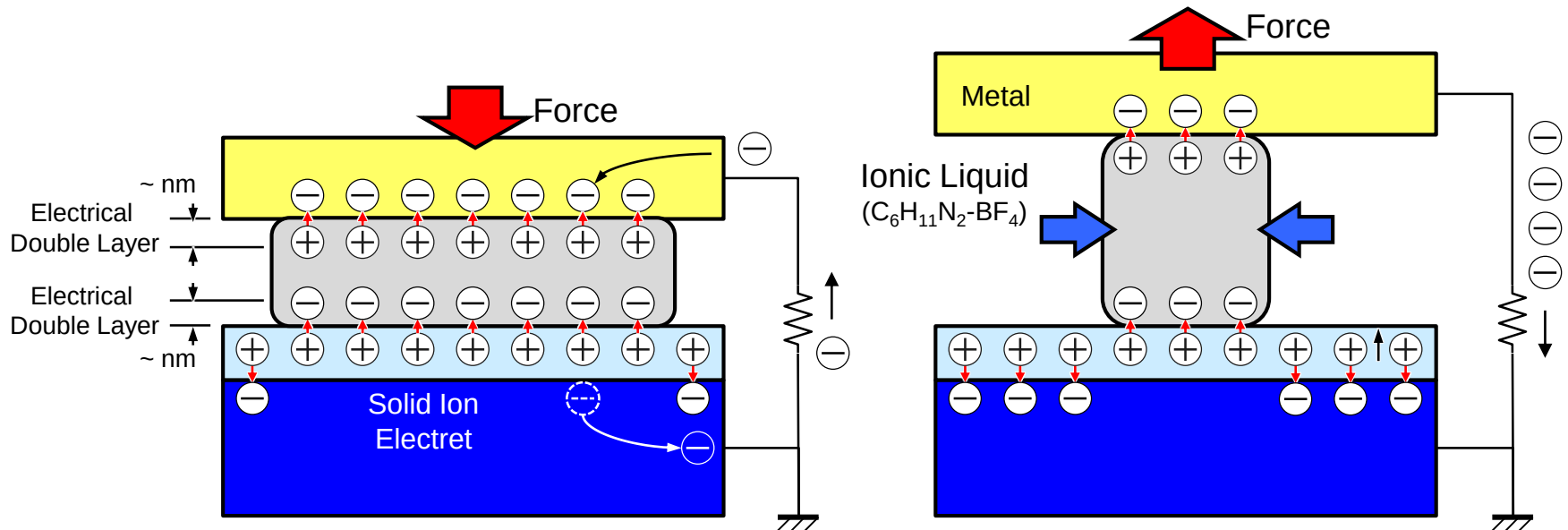
MEMS Energy Harvester with High Density Electret

Target 10 mW or Larger



Ionic Liquid for Output Coupling

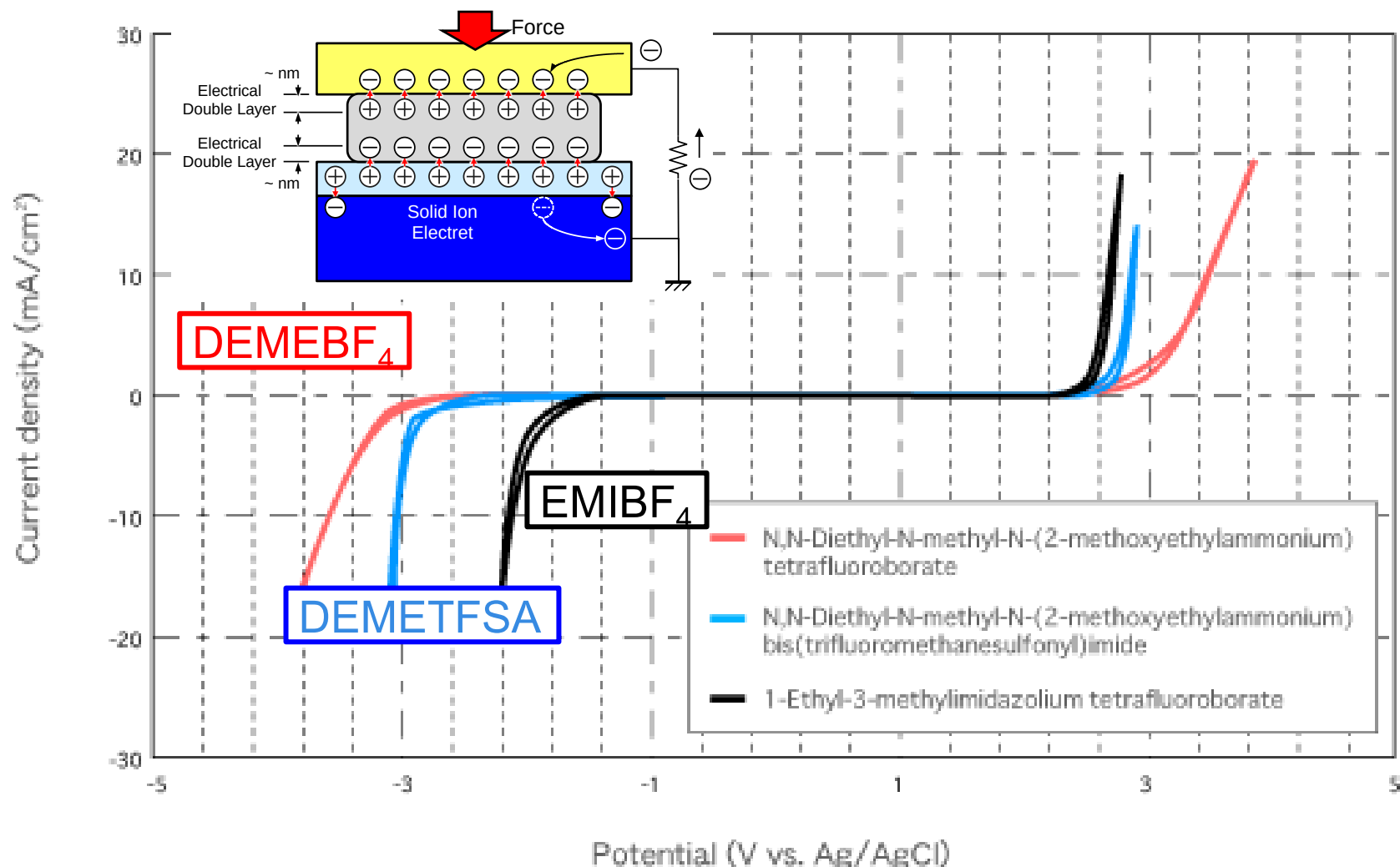
Large Capacitor due to Electrical Double Layer (~ nm)



S. Yamada, H. Mitsuya, and H. Fujita, Power MEMS 2014

Ionic Liquid for Output Coupling

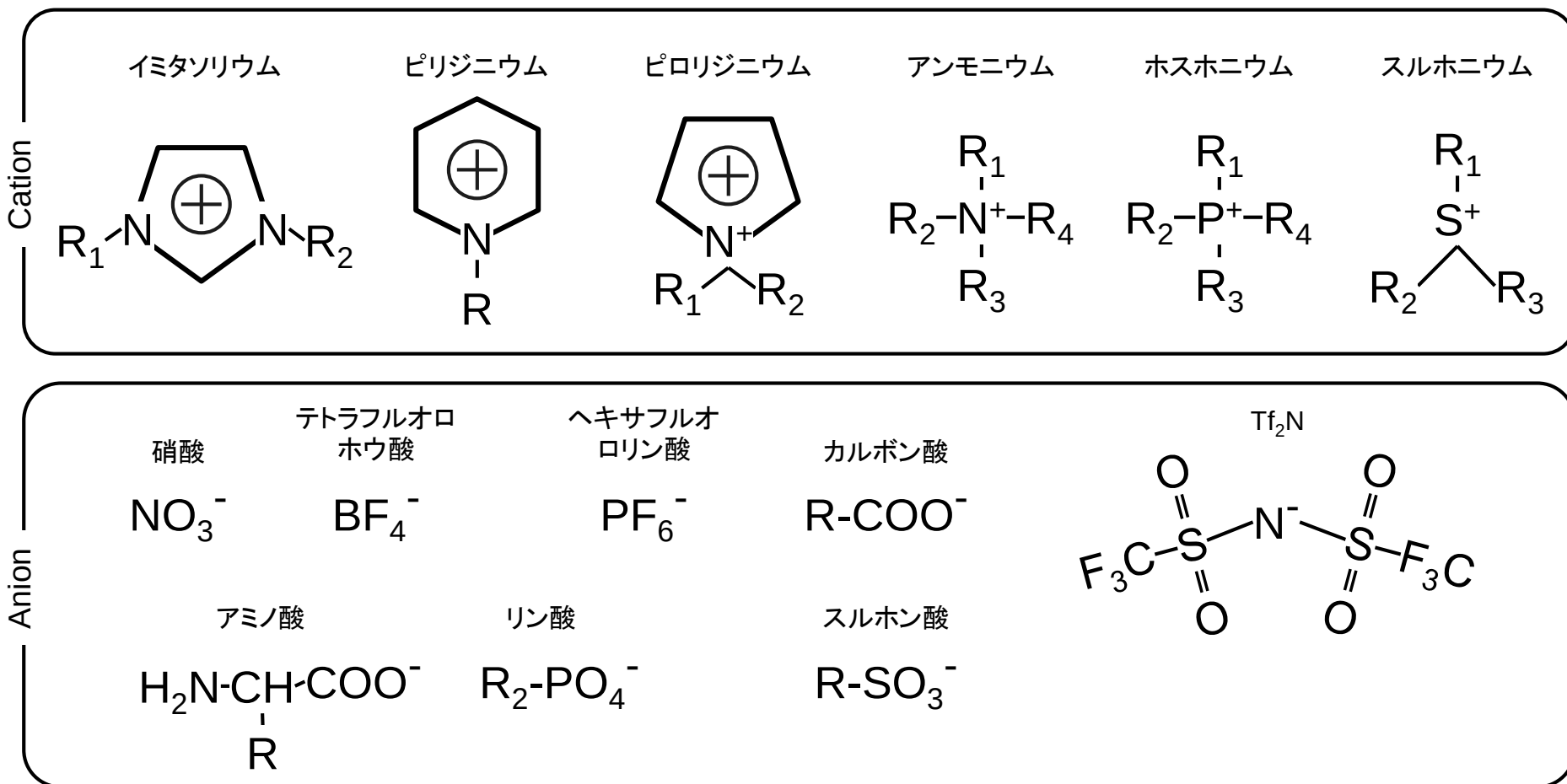
Voltage Window (capacitor) $\pm 1 \sim 3$ V



出典: 日清紡ホールディングス株式会社HP (<http://www.nisshinbo.co.jp/index.html>)

Examples of Ionic Liquids

MEMS EH & Ionic Liquid: Details to be reported at MEMS 2014 in Portugal



Summary

1. Energy harvester (EH) is the key device for future trillion sensor era.
2. Solid ion can make high density electret source for MEMS EH.
3. Silicon micromachining has favorable scaling roadmap to improve the electret EH output (100-fold in 15 years).
4. Ionic liquid would further push up the efficiency.

