

# ワイヤレス電力伝送・通信シート

## Wireless Power Transmission and Communication Sheets

高宮 真<sup>1</sup>・関谷 毅<sup>2</sup>・染谷隆夫<sup>2</sup>・桜井貴康<sup>3</sup> <sup>1</sup> 東京大学大規模集積システム設計教育研究センター (VDEC), <sup>2</sup> 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻, <sup>3</sup> 東京大学生産技術研究所

M. Takamiya,<sup>1</sup> T. Sekitani,<sup>2</sup> T. Someya<sup>2</sup>, and T. Sakurai,<sup>3</sup> <sup>1</sup> VLSI Design and Education Center (VDEC), University of Tokyo, <sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, School of Engineering, University of Tokyo, <sup>3</sup> Institute of Industrial Science, University of Tokyo

<sup>1</sup> Tel: +81-3-5452-6253, Fax: +81-3-5452-6632, E-mail: mtaka@iis.u-tokyo.ac.jp

Both a wireless power transmission sheet and a communication sheet are developed as elements in the infrastructure for power supply and communication in future ubiquitous electronics or ambient intelligence. These sheets are made with plastic MEMS switches and organic FET's for printable low-cost and large-area electronics, and can be embedded in tables, walls, and ceilings. They detect the position of an electronic device placed on them, and provide wireless power supply and low-power wireless communication.

**Key words:** large-area electronics, wireless power transmission sheet, communication sheet, organic FET, plastic MEMS

### 1. はじめに

Fig. 1 に示すような 1,000 個から 10,000 個のオーダーの多数個の電子デバイスがわれわれの生活環境に溶け込み、人間生活の安心・安全・快適に貢献するユビキタスエレクトロニクスやアンビエント・インテリジェンスの世界が将来、実現することが予測されている。この場合に問題となるのが、多数個の電子デバイスに対する給電と通信である。多数個のワイヤレスセンサノードに乾電池を搭載することは電池交換などのメンテナンスのコストを考慮すると問題である。また、多数個のワイヤレスセンサノードの通信により、消費電力が爆発的に増大することは許されない。

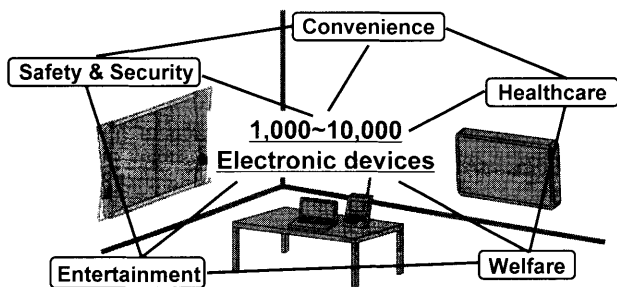


Fig. 1 Future ubiquitous electronics or ambient intelligence.

そこで、アンビエント・インテリジェンスの世界における給電と通信のインフラの一つとして、「無線電力伝送シート」<sup>1,2)</sup>と「通信シート」<sup>3,4)</sup>を開発した。これらのシートを机や部屋の壁・天井に設置することにより、机や壁の任意の位置に置かれたワイヤレスセンサノードに対して、電気的接触なしで給電と低消費電力の通信機能を提供することができる。

本稿では、2章で無線電力伝送シートの動作原理・デバイス構造・試作評価結果について示し、3章で通信シートの動作原理・デバイス構造・試作評価結果について示す。4章で将来展望を示し、最後に5章でまとめる。

### 2. 無線電力伝送シート

#### 2.1 特徴と動作原理

Fig. 2 に開発した無線電力伝送シートの特徴を示す<sup>1),2)</sup>。シート上の任意の位置に置かれた電子機器の位置を検出し、電力を電送することができる。無線電力伝送シートはポリイミドのフィルム上に印刷ベースの製造プロセスで作製するため、薄型でフレキシブルであり、大面積を低コストで製造可能である。電力伝送は対向したコイル間で電磁誘導の原理で行う。これにより、電気的接点なしで給電を行うことが可能である。しかし、電磁誘導を用いた電力伝送の欠点はコイルの位置ずれによって電力伝送効率が劣化

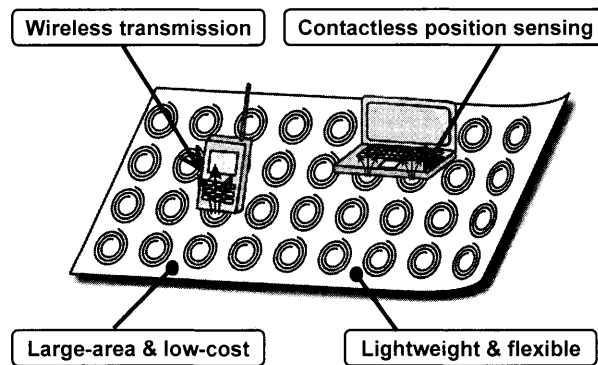


Fig. 2 Overview of a wireless power transmission sheet.

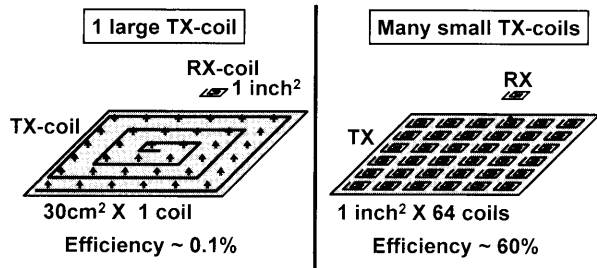


Fig. 3 Measured power transmission efficiency with two different transmitter coils.

してしまう点である。無線電力伝送シート上の受電コイルに最も確実に電力伝送する単純な方法は、無線電力伝送シート全体を一つの送電用コイルで覆うことである。しかし、この場合の電力伝送効率は低い。Fig. 3 に一つの大きい送電用コイルと、アレー状の小さい送電用コイルを用いて受電コイルの真下の送電用コイルのみを活性化させた場合の電力伝送効率の実測結果の比較を示す。後者の場合、送電用コイルと受電コイルの直径は同じである。電力伝送効率は、一つの大きい送電用コイルの0.1%に対して、小さい送電用コイルは60%であった。したがって、送電用コイルの細分化と選択的活性化が、電力伝送効率の低下を回避するキー技術であるといえる。しかし、送電用コイルの選択的活性化を実現するためには、受電コイルの位置検出が必要となる。そこで、アレー状の送電用コイルを一つずつスキャンし、受電用コイルが送電用コイルの上に存在するか否かを、送電用コイルのインピーダンスの変化によりチェックする位置検出技術を新たに開発した。

## 2.2 デバイス構造と試作評価結果

Fig. 4 に無線電力伝送シートのデバイス構造を示す。21 cm 角の4枚のプラスチックシートが積層されている。表面から第1のシートは送電用コイルアレー、第2のシートは送電用コイルを選択するためのプラスチック MEMS スイッチアレー、第3のシートは位置検出用のコイルアレー、第4のシートは位置検出用のコイルを選択するための有機トランジスタアレーを搭載している。すべて、原理的には印刷技術で製造可能であるため、大面積を低コストで製造できるポテンシャルを有している。それぞれのシートは1インチ(=2.54 cm)ピッチで8×8のアレー構造を有する。コイルを選択するためのスイッチとしてプラスチック MEMS スイッチと有機トランジスタの2種類を使い分けた理由を以下で説明する。プラスチック MEMS スイッチはオン抵抗が低い(10 Ω 以下)が低速(1 Hz 程度)なのに対して、有機トランジスタは相対的に高速(100 Hz 以上)だがオン抵抗が高い(1 kΩ 以上)。そこで、スイッチング頻度は低い寄生抵抗による電力伝送効率の低下の回避が重要な電力伝送に、プラスチック MEMS スイッチを用いた。一方、高抵抗は問題とならないがスイッチング頻度の高い受電用コイルの位置検出に、有機トランジスタを

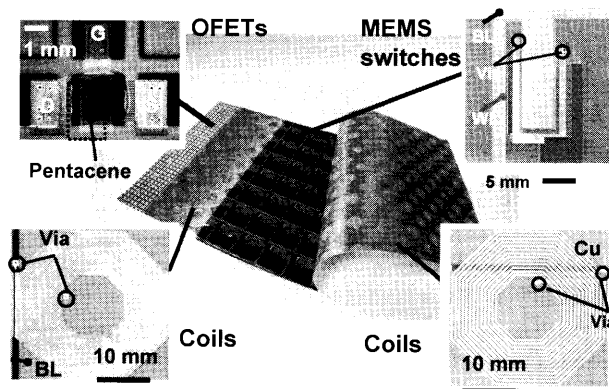


Fig. 4 Device structure of a wireless power transmission sheet.

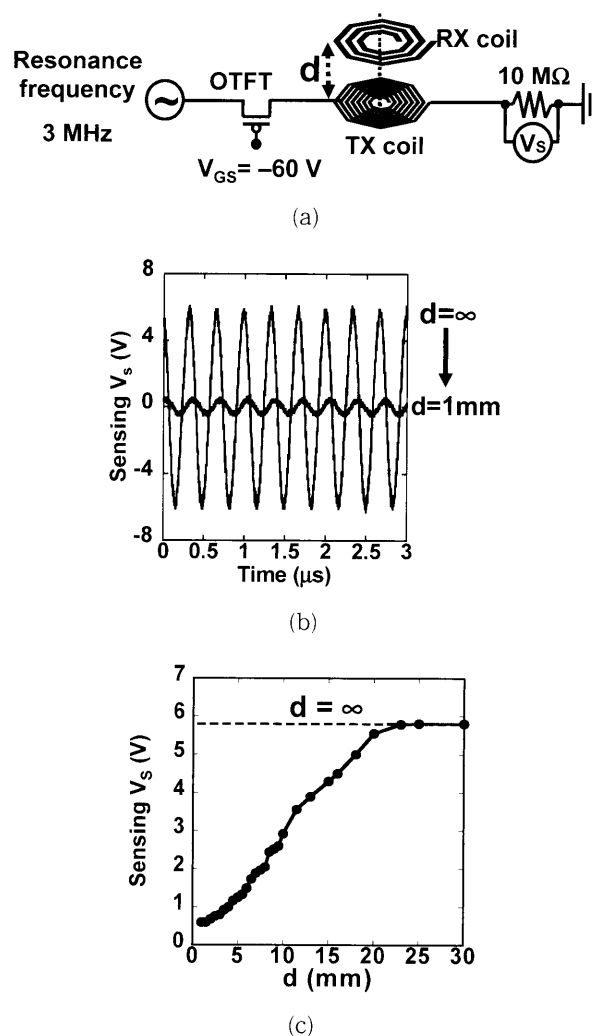


Fig. 5 Measured position detection. (a) Measurement setup. (b) Measured waveform of  $V_s$ . (c) Measured dependence of the amplitude of  $V_s$  on distance.

用いた。

Fig. 5 に受電用コイルの位置検出の実測結果を示す。Fig. 5(a) に測定系を示す。位置検出用のコイル (TX coil) に 3 MHz の信号を加え、受電用コイル (RX coil) の位置

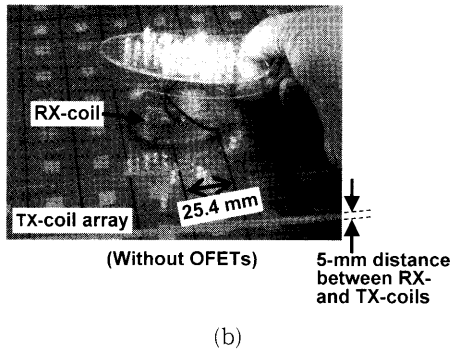
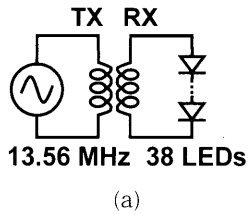


Fig. 6 Measured wireless power transmission. (a) Measurement setup. (b) Demonstration of wireless power transmission.

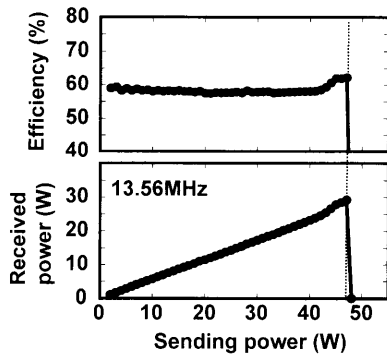


Fig. 7 Measured power transmission efficiency.

によって位置検出用のコイルのインピーダンスが変化し、位置検出用のコイルに流れる電流が変化することを電圧 ( $V_s$ ) で検出する。Fig. 5(b) に受電用コイルと位置検出用コイルの距離が異なる  $V_s$  波形の実測結果を示す。Fig. 5(c) に  $V_s$  振幅の受電用コイルと位置検出用コイルの距離依存の実測結果を示す。距離に応じて  $V_s$  振幅が変化するため、 $V_s$  振幅をモニタすることにより、送電用コイルアレイの中でどのコイルの上に受電用コイルがあるかを位置検出することができる。

Fig. 6 に無線電力伝送のデモとして LED を点灯させた例を示す。Fig. 6(a) に無線電力伝送の測定系の回路図を示す。周波数は 13.56 MHz で、負荷として 38 個の LED を直列に接続している。Fig. 6(b) に無線電力伝送のデモを示す。厚さ 5 mm のアクリル板を介して、LED へ無線で電力を伝送できていることが確認できる。

Fig. 7 に電力伝送効率の実測結果を示す。周波数は 13.56 MHz で、送電用コイルと受電コイルの直径は同じで位置ずれがない条件である。受信電力はスペクトラムア

ナライザで測定した。電力伝送効率は最大 62% で、最大伝送電力は 29 W であった。最大伝送電力はコイルの寄生抵抗による発熱で制限されており、コイルを厚膜化すればさらなる大電力化と高効率化の可能性が残されている。

### 3. 通信シート

#### 3.1 特徴と動作原理

前章で無線電力伝送シートの紹介を行ったが、「何に電力伝送すべきか」をよりインテリジェントに行うためには、前章で述べたインピーダンスの変化による位置検出だけでは不十分であり、電子機器の ID を識別するような無線通信機能も必要となる。また、1章で述べたようにアンビエント・インテリジェンスの世界におけるインフラとしても給電と通信の機能は重要である。そこで、無線電力伝送シートと併用することができる通信シートを開発した<sup>3), 4)</sup>。

Fig. 8 に開発した通信シートの全体写真を示す。通信シートの表面には、ポリイミドのフィルム上にインクジェットで印刷した銀の容量結合通信用のパッドアレイが形成されている。

Fig. 9 に通信シートの特徴を示す。通信シートでは、メートル (m) 程度の距離の有線通信とマイクロメートル ( $\mu\text{m}$ ) 程度の距離の至近距離無線通信を組み合わせることにより、無線通信と有線通信の中間領域の新しい通信を実現する。すなわち、ケーブル接続なしでシート上に置かれた任意の位置の物体間で通信できる一方、大消費電力・セキュリティ・周波数帯域割り当ての無線通信の欠点を有線通信により解決している。これにより、2次元平面上の移動の自由度を提供し、従来の無線通信よりも低電力な通信

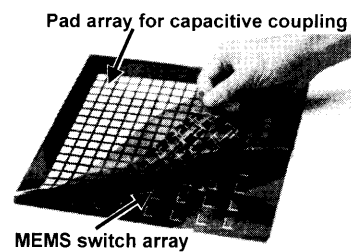


Fig. 8 Bird's-eye photo of a communication sheet.

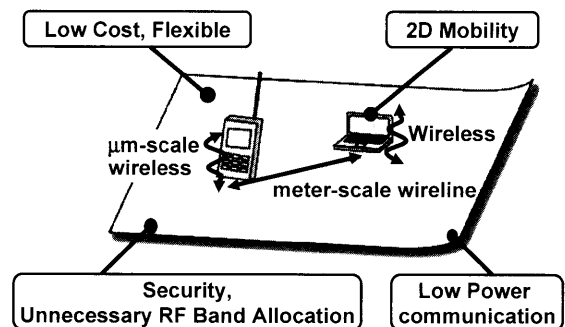


Fig. 9 Overview of the communication sheet.

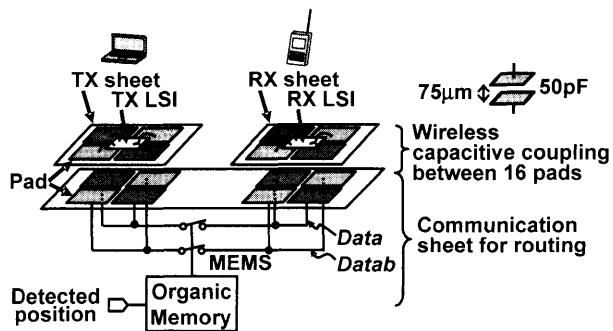


Fig. 10 Principle of operation of the communication sheet.

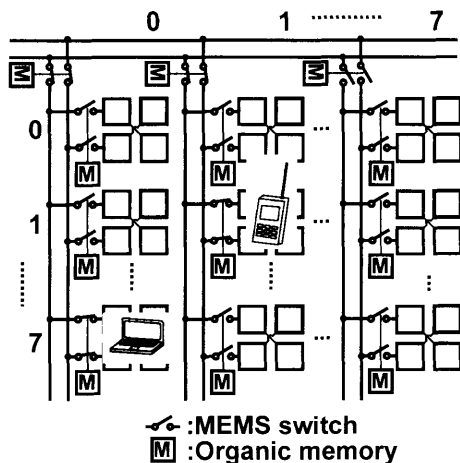


Fig. 11 Routing in the communication sheet.

を実現することができる。また、この通信シートを机や壁に貼りめぐらせるためには、壁紙のような大面積性とフレキシブル性が必要となる。そこで、フィルム上に印刷技術で形成する有機トランジスタとプラスチック MEMS を用いた大面積エレクトロニクス技術を用いることにより、大面積の通信シートを低コストで実現することができる。

通信シートでの至近距離無線通信方式として、誘導結合と容量結合の二つの方式が考えられる。今回は、通信シートのデバイス構造と目標データレート (100 kbps) における消費電力を計算で比較し、容量結合を採用した。Fig. 10 に通信シートにおける容量結合トランシーバの動作原理図を示す。送信 LSI は送信シート上に形成された四つの容量結合用パッドと接続されている。同様に、受信 LSI は送信シート上に形成された四つの容量結合用パッドと接続されている。送信/受信シート上の容量結合用パッドが、通信シート上の容量結合用パッドと対向することにより、容量結合を実現する。典型的な容量結合用パッド間の距離は  $75\mu\text{m}$ 、容量は  $50\text{pF}$  である。送信 LSI と受信 LSI の間に共通グラウンドがないため、差動信号伝送を行っている。また、送信/受信シート上の容量結合用パッドは、送信/受信シートの  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  の回転を許容するためにパッド数を二つではなく四つにしている。通信シ

ト上の送信/受信シート上の位置検出は、2 章で述べた位置検出技術により行う。位置検出結果に応じて、通信シート上の任意の 2 点間を MEMS スイッチを介して有線で接続する。各 MEMS スイッチは有機不揮発メモリ<sup>4)</sup>を有しており、MEMS スイッチをオンすべきかオフすべきかの情報を記憶することができる。MEMS スイッチは有機トランジスタに比べ、オン抵抗が低く寄生容量が小さいことが特徴である。

Fig. 11 に通信シートにおける経路形成方式を示す。4 個のパッドを 1 組として、通信シートには 8 組  $\times$  8 組のパッドアレーと、 $9 \times 8$  の MEMS スイッチアレー対と、 $9 \times 8$  の有機不揮発メモリアレーが形成されている。Fig. 11 に示す経路形成方式を用いれば、通信シートの任意の 2 点間を最大四つの MEMS スイッチを介して接続することができる。

### 3.2 デバイス構造と試作評価結果

Fig. 12 に通信シートのデバイス構造を示す。通信シートのサイズは  $20\text{cm}$  角で、機能的には容量結合用パッド・プラスチック MEMS スイッチ・有機不揮発メモリ・位置検出用コイルの 4 種類のシートが積層されており、パターンはすべて印刷技術 (インクジェット印刷またはスクリーン印刷) で形成されている。容量結合用パッドの大きさは  $9.7\text{mm}$  角である。

通信シートにおける容量結合通信の消費電力を下げるために、データの変化時にのみ送信回路出力を遷移させる「データエッジ信号伝送方式」と、「DC 電力を消費しないパルス検出回路」の二つの回路技術を開発した<sup>3)</sup>。Fig. 13 にこれらの回路技術を搭載した容量結合トランシーバ LSI のチップ写真を示す。 $1.8\text{V}$ ,  $0.18\mu\text{m}$  CMOS プロセスで試作した。送信回路のコア回路の大きさは、 $55\mu\text{m} \times 45\mu\text{m}$ 、受信回路のコア回路の大きさは、 $25\mu\text{m} \times 39\mu\text{m}$  である。

Table 1 に試作した容量結合トランシーバ LSI を含む通信シート全体の性能を示す。データレートは典型値で  $100\text{kbps}$ 、通信シートを除く LSI チップ単体での最大値

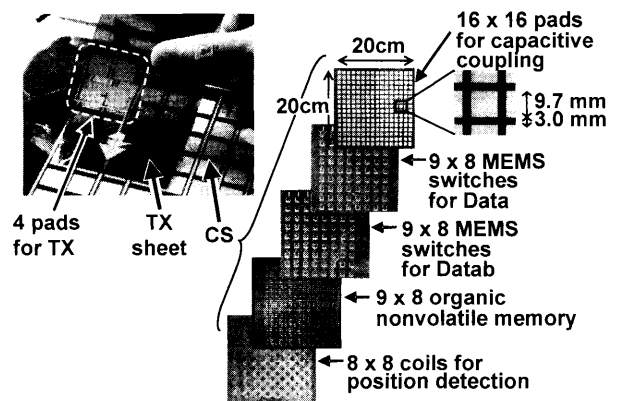


Fig. 12 Device structure of the communication sheet.

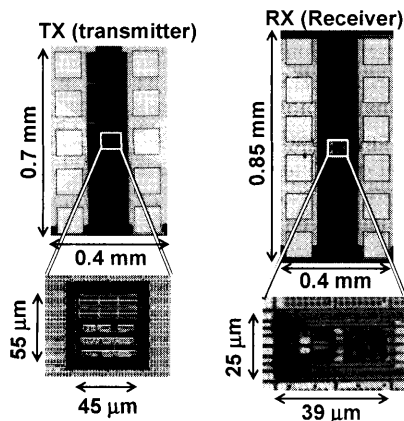


Fig. 13 Chip micrographs and layout of a capacitive coupling transceiver.

Table 1 Performance summary of the communication sheet

Technology		0.18μm CMOS
Supply Voltage		1.8V
Data Rate	Typ	100kbps
	Max	8Mbps
Communication Distance	Capacitive Coupling	150μm
	Wireline	60cm
Alignment Tolerance		7.5mm
Power @100kbps	TX	9.73μW
	RX	0.97μW
	Total	10.7μW
Energy per bit @100kbps		107pJ/bit
Core Area	TX	2475μm <sup>2</sup>
	RX	975μm <sup>2</sup>

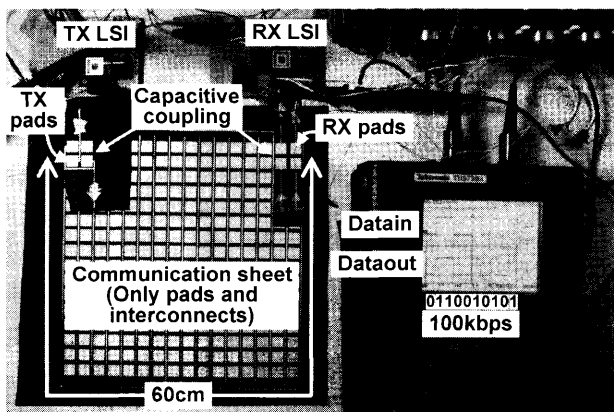


Fig. 14 Demonstration of 100 kbps 60 cm communication via a communication sheet.

は 8 Mbps である。通信距離は容量結合部分が最大 150 μm, 通信シート上の有線部分が最大 60 cm である。100 kbps における消費電力は, 送信回路で 9.73 μW, 受信回路で 0.97 μW, 合計で 10.7 μW である。これを 1 ビット当たりのエネルギーに換算すると 107 pJ/bit となる。

Fig. 14 に通信シートでの 100 kbps の通信デモの写真

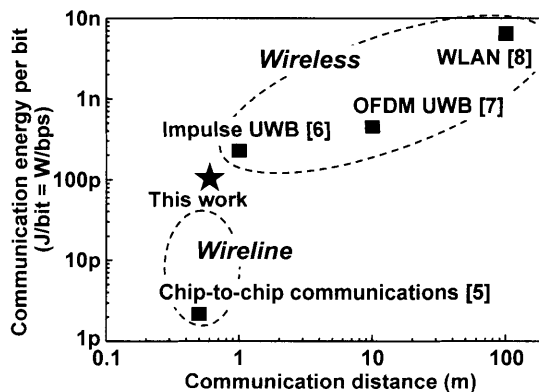


Fig. 15 Comparison with the state-of-the-art wireless and wireline communications.

を示す。送信 LSI と接続された送信シート上の 4 パッドと、受信 LSI と接続された受信シート上の 4 パッドが、二つの容量結合と通信シート上の 60 cm 配線を経由して通信することに成功している。送信 LSI と受信 LSI の間に共通グラウンドがなくても通信できることを実証するために、送信 LSI と受信 LSI はグラウンドを分離した乾電池駆動電源により動作させ、受信波形を乾電池駆動オシロスコープにより測定している。なお、この測定では原理チェックのために、通信シートはパッドと配線のみを含み、MEMS スイッチや有機不揮発メモリは含んでいない。

最後に、Fig. 15 に 1 ビット当たりの通信エネルギーと通信距離に関する通信シートと従来の無線・有線通信<sup>5)~8)</sup>との比較を示す。従来の無線・有線通信としては学会レベルで最も低電力なデータをプロットした。通信シートは 60 cm の通信を 107 pJ/bit で実現しており、従来の無線の可動性の長所を残しつつ、無線通信としては最低エネルギーを達成することに成功している。

#### 4. 将来展望

Fig. 16 に、今回、開発した無線電力伝送シートが開く未来のアンビエント・インテリジェンスの世界のイメージ図を示す。部屋の床・壁や机の上に無線電力伝送シートを敷き詰めることにより、シート上に置かれたあらゆる電気・電子機器に給電することができる。例えば、壁掛けテレビに壁から給電し、机上の携帯電話やノートパソコンに机から給電し、床上を動き回るロボットや掃除機に床から給電する。通信シートに関しても同様のアプリケーションが考えられ、印刷技術で作成可能な有機トランジスタやプラスチック MEMS スイッチを用いた大面積のシート型エレクトロニクスが、従来の LSI ではカバーしきれていない新たなエレクトロニクスのアプリケーション領域を開拓することが期待されている。

今後の開発が期待される要素技術としては、(1) 電磁誘導における電力伝送の長距離化やコイルの小型化に寄与する高透磁率 (例えば 1 GHz まで比透磁率が 100) の材料の

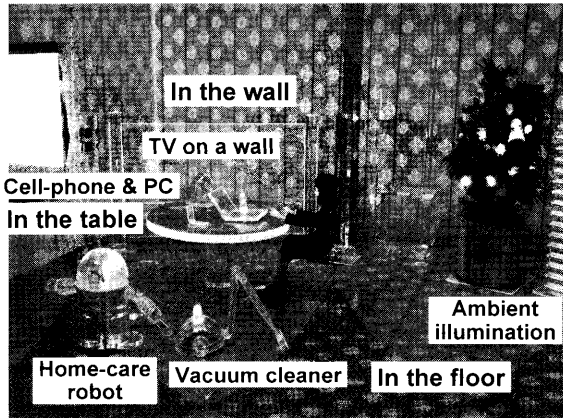


Fig. 16 Expected applications of the wireless power transmission sheet.

開発, (2) 磁気共鳴<sup>9)</sup>や電波<sup>10)</sup>を用いた, 電磁誘導よりも長距離で高効率かつ位置ずれにロバストな無線電力伝送技術の開発が考えられる。

## 5. ま と め

1,000 個から 10,000 個のオーダの多数個の電子デバイスがわれわれの生活環境に溶け込み, 人間生活の安心・安全・快適に貢献するアンビエント・インテリジェンスの世界における給電と通信のインフラの一つとして, 「無線電力伝送シート」と「通信シート」を開発した。これらのシートを机や部屋の壁・天井に設置することにより, 机や壁の任意の位置に置かれたワイヤレスセンサノードに対して, 電氣的接触なしで給電と低消費電力の通信機能を提供することができる。

**謝 辞** 本研究の一部は CREST/JST と文部科学省の援助を受けて行われた。

## References

- 1) M. Takamiya, T. Sekitani, Y. Miyamoto, Y. Noguchi, H. Kawaguchi, T. Someya, and T. Sakurai: IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 362-363, Feb. 2007.
- 2) T. Sekitani, M. Takamiya, Y. Noguchi, S. Nakano, Y. Kato, K. Hizu, H. Kawaguchi, T. Sakurai, and T. Someya: IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), pp. 287-290, Dec. 2006.
- 3) L. Liu, M. Takamiya, T. Sekitani, Y. Noguchi, S. Nakano, K. Zaitzu, T. Kuroda, T. Someya, and T. Sakurai: IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 292-293, Feb. 2008.
- 4) T. Sekitani, Y. Noguchi, S. Nakano, K. Zaitzu, Y. Kato, M. Takamiya, T. Sakurai, and T. Someya: IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), pp. 221-224,

Dec. 2007.

- 5) R. Palmer, J. Poulton, W. J. Dally, J. Eyles, A. M. Fuller, T. Greer, M. Horowitz, M. Kellam, F. Quan, and F. Zarkeshvari: IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 440-441, Feb. 2007.
- 6) I. D. O'Donnell and R. Brodersen: IEEE Symposium on VLSI Circuits, pp. 200-201, June 2006.
- 7) J. R. Bergervoet, K. S. Harish, S. Lee, D. Leenaerts, R. van de Beek, G. van der Weide, and R. Roovers: IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 112-113, Feb. 2007.
- 8) M. Simon, P. Laaser, V. Filimon, H. Geltinger, D. Friedrich, Y. Raman, and R. Weigel: IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 562-563, Feb. 2007.
- 9) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic: *Science*, **317**, 83 (2007).
- 10) A. Sample and J. R. Smith: IEEE Radio and Wireless Symposium, pp. 16-18, Jan. 2009.

(2009年7月23日受理)

高宮 真 たかみや まこと

2000年 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程修了, 同年 NEC 入社, 2005年 東京大学大規模集積システム設計教育研究センター准教授, 現在に至る。

専門 VLSI 回路設計

博士(工学)

関谷 毅 せきたに つよし

2003年 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了, 同年 東京大学大学院工学系研究科量子相エレクトロニクス研究センター助教, 2009年 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻助教, 現在に至る。

専門 有機・分子エレクトロニクス, 有機半導体の物性物理

博士(工学)

染谷隆夫 そめや たかお

1997年 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程修了, 東京大学助手, 講師を経て, 2003年 東京大学大学院工学系研究科量子相エレクトロニクス研究センター准教授, 2009年 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻教授, 現在に至る。

専門 有機トランジスタ, 有機・分子エレクトロニクス

博士(工学)

桜井 貴康 さくらい たかやす

1981年 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程修了, 同年 東芝入社, 1996年 東京大学生産技術研究所教授, 現在に至る。

専門 高速低消費電力 LSI 設計

(工学博士)