

ユビキタスネットワークとその集積化技術

Ubiquitous network and its integration technology

東京工業大学 大学院
理工学研究科 電子物理工学専攻

松澤 昭

内容

- ユビキタスネットワーク
- 無線TAG
- 電池と自然エネルギーを用いた電源
- FD-SOIを用いた低電圧・低電力アナログ回路技術

ユビキタスネットワーク

ユビキタスネット:RF-TAG

このような「ゴマ粒チップ」が全ての物に入りネットワークを形成しようとしている

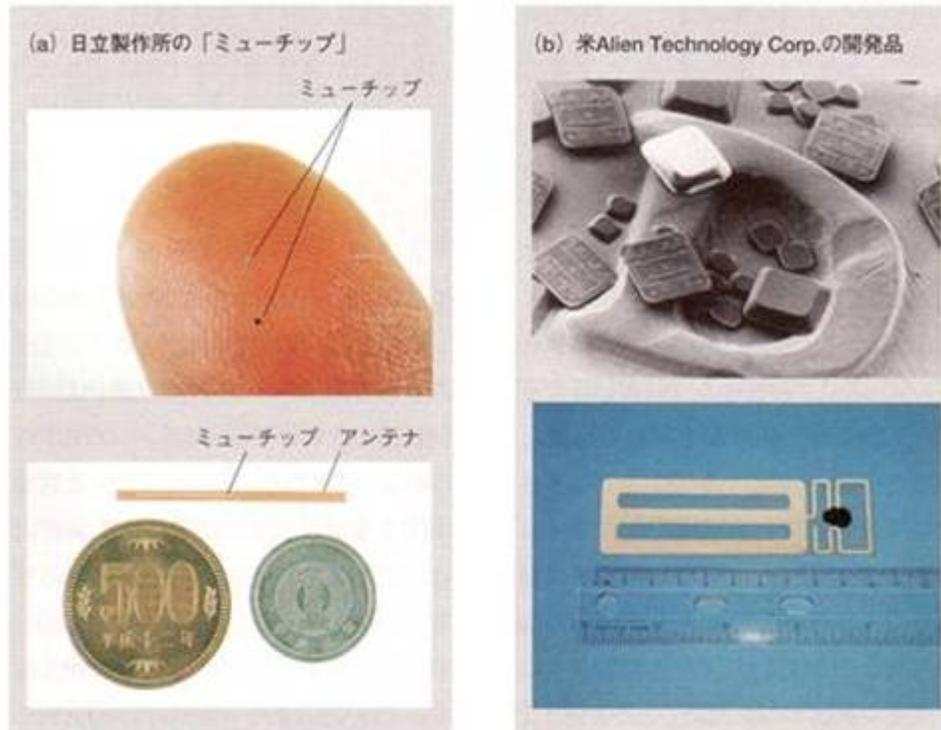


図1 「粉末」のような無線タグ用チップが登場

日立製作所の「ミューチップ」の外形寸法はわずか $0.4\text{mm} \times 0.4\text{mm} \times 0.06\text{mm}$ である (a)。これにアンテナを外付けて使う。通信に用いる周波数は 2.45GHz である。米Alien Technology Corp.が開発したチップは1辺が $0.1\text{mm} \sim 0.2\text{mm}$ とさらに小さい (b)。 $30\text{mm} \times 100\text{mm}$ 程度のアンテナを外付けすることで、リーダーと 5m ほど離れても使えるという。用いる周波数は 915MHz (米国向け)、 868MHz (欧州向け)、 2.45GHz (日本向け) の3種類。

日経エレクトロニクス
2002. 2. 25, pp. 132

ユビキタスネット：センサーチップ

各種センサーがいろいろな物に装着されネットワークに繋がろうとしている。



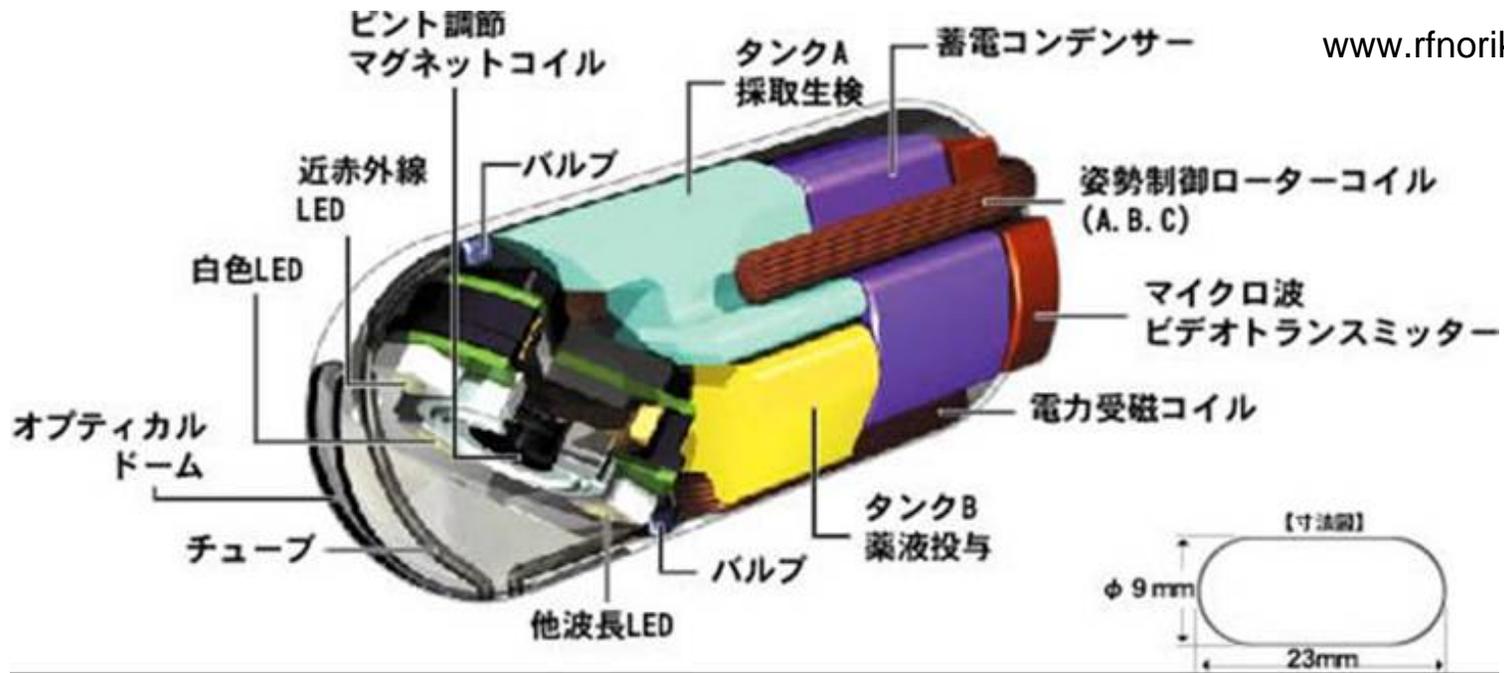
日経エレクトロニクス
2002. 7. 15, pp. 104

ユビキタスネット:カプセル型胃カメラ

更に体内にまでセンサーテレメトリーシステムが使われようとしている。

株式会社 アールエフ

www.rfnorika.com

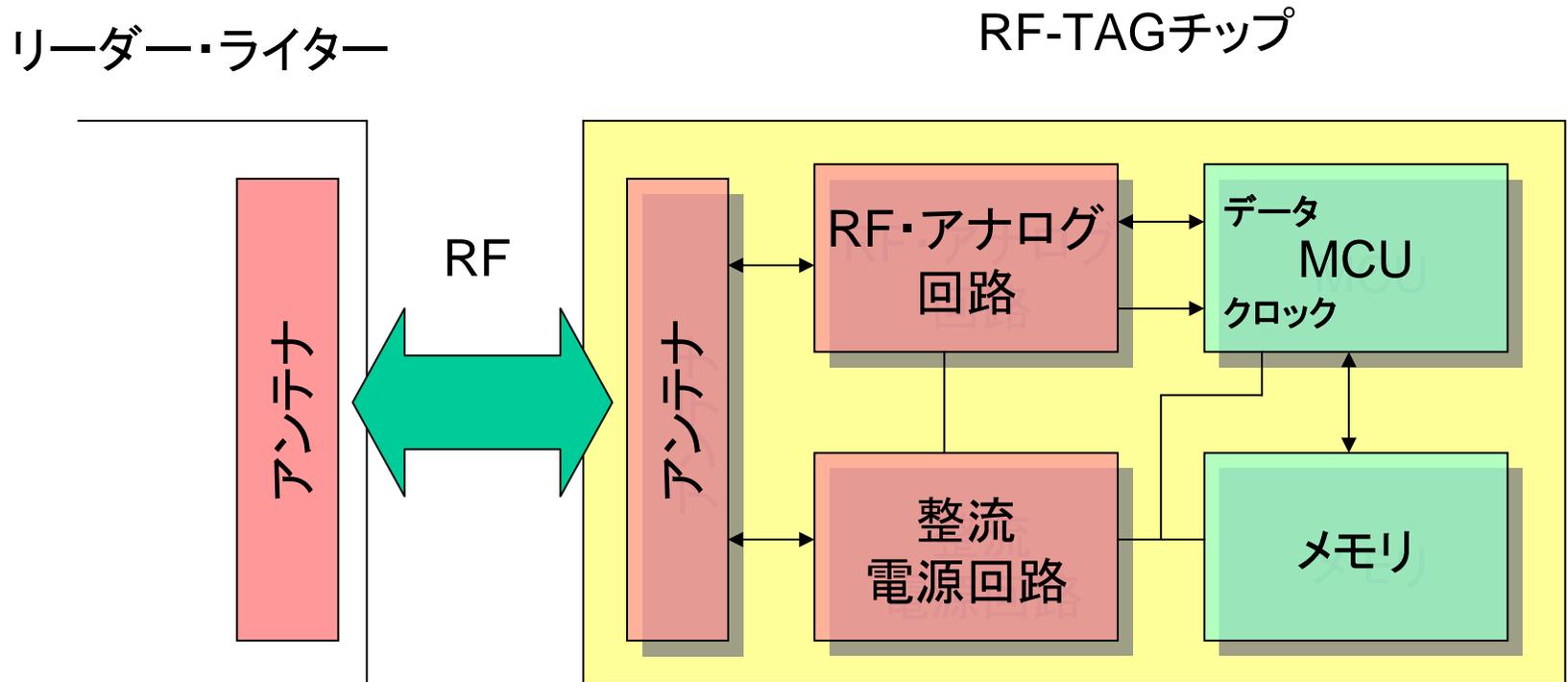


当チームが開発したカプセル型内視鏡「NORIKA」システムは超小型カプセル型CCDカメラと無線で制御・操縦するコントローラ、電力送信と姿勢制御用のコイルを内蔵したベストで形成される。外形は直径9mm、長さ23mmのピル型、筐体部分は樹脂を使用する。内部側面に3つの姿勢制御ローターコイルを囲むように配置し、レンズ部分は周囲にピント調整マグネットコイルと4つのLED、中央の空間部にはバルブをつけたタンクを2つ置く。電力を蓄えるための蓄電コンデンサーとマイクロ波送信部を含めてカメラが完成する。

無線TAG

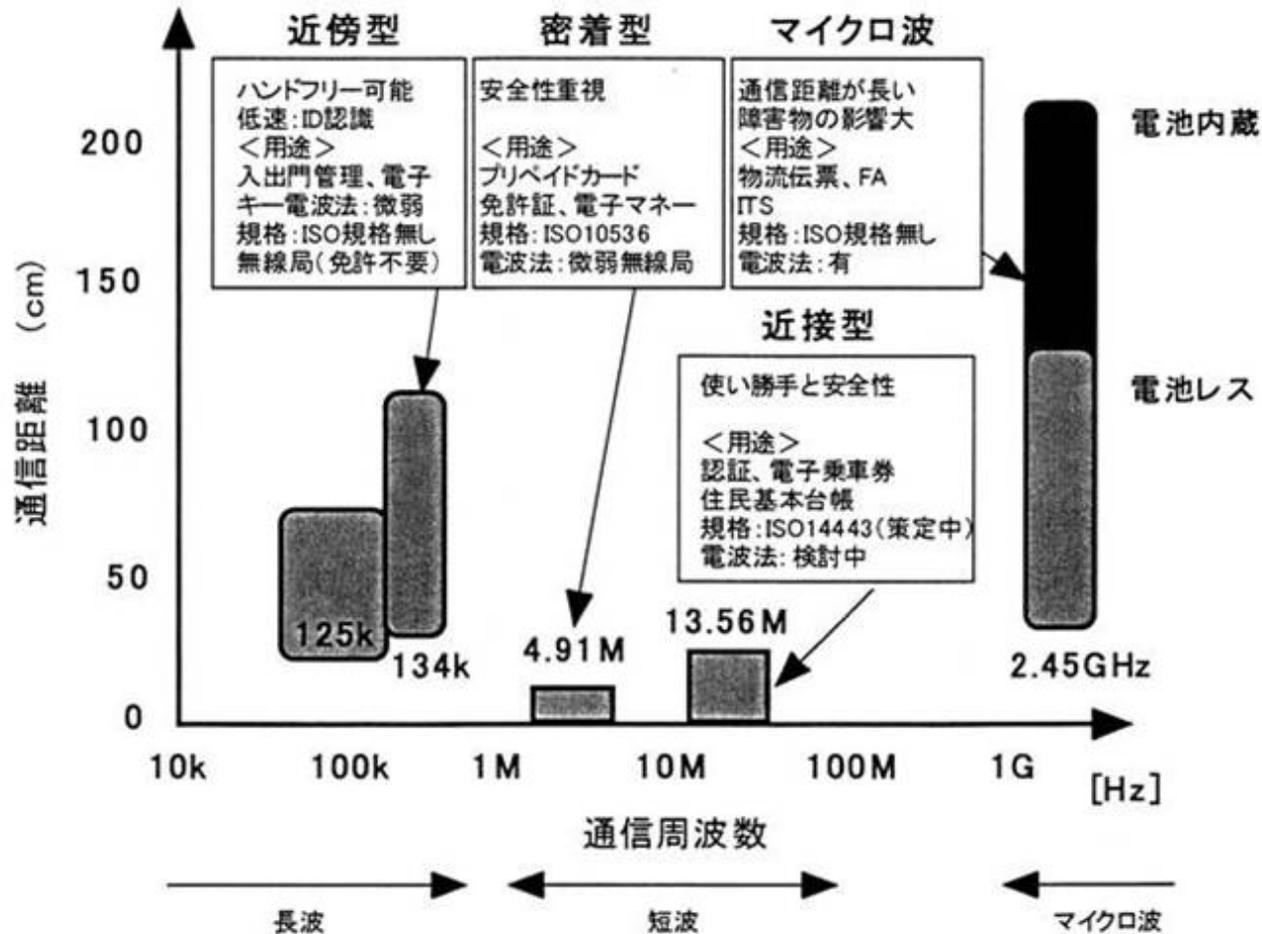
無線TAGチップの構成

無線TAGチップはRFを用いて情報ネットワークを構成するほか動作電力もRFから得ている。



RF-ICカードの分類

RF-ICカードは用いる周波数帯、通信距離により分類される。



無線TAGの主な種類と周波数帯

無線TAGの主な種類

無線タグの種類	特徴	主な応用分野	コスト
読み出し専用無線タグ	データの読み出しだけが可能。主に数十ビットから成る固有のID番号が書き込んである。	▶生産工程管理 ▶物流システム	低
書き込み可能な無線タグ	数バイト～数十Kバイトのメモリ（EEPROMやFeRAM）を内蔵し、データの書き込みが可能。	▶偽造防止 ▶手荷物管理、など	低～中
マイクロプロセッサ内蔵型無線タグ	マイクロプロセッサを搭載し、内蔵ROM内のOSや、プログラムを使って動作する。主に非接触ICカードなど、セキュリティを高めたい用途で利用する。暗号化回路を搭載した製品もある。	▶電子決済 ▶入退室管理 ▶会員カード、など	高
センサ付き無線タグ	温度センサを搭載したものが主流。このほか、圧力センサなどを搭載した製品を開発する動きもある。	▶動物の固体識別 ▶タイヤの管理、など	高

日経エレクトロニクス
2002. 2. 25

無線TAGの主な周波数帯

使用周波数	135kHz以下	13.56MHz	860MHz～911MHz (UHF)	2.45GHz	5.8GHz
規格番号	ISO18000-2	ISO18000-3	ISO18000-6	ISO18000-4	ISO18000-5
規格化の時期 (推定)	2003年3月	2003年3月	2003年10月	2003年3月	2003年10月
概要	<ul style="list-style-type: none"> 通信距離が長い（現行の電波法上で高出力化が可能） 金属の影響を受けにくい 「イモビライザー」などで採用 無線タグの薄型/小型化が難しい 通信速度が遅い 	<ul style="list-style-type: none"> 無線タグの薄型/小型化が可能 通信距離が短い 非接触ICカードとの共用が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 主に米国で使われている 日欧では携帯電話の周波数帯域と重なる。日本の電波法では使用できない。 	<ul style="list-style-type: none"> 通信距離が長い 無線タグの薄型/小型化が可能 無線LANなどと周波数帯域が重なる 水に吸収される 	<ul style="list-style-type: none"> 国内では有料道路の自動料金収受システム（ETC）で採用

無線TAGの代表構成と電源回路

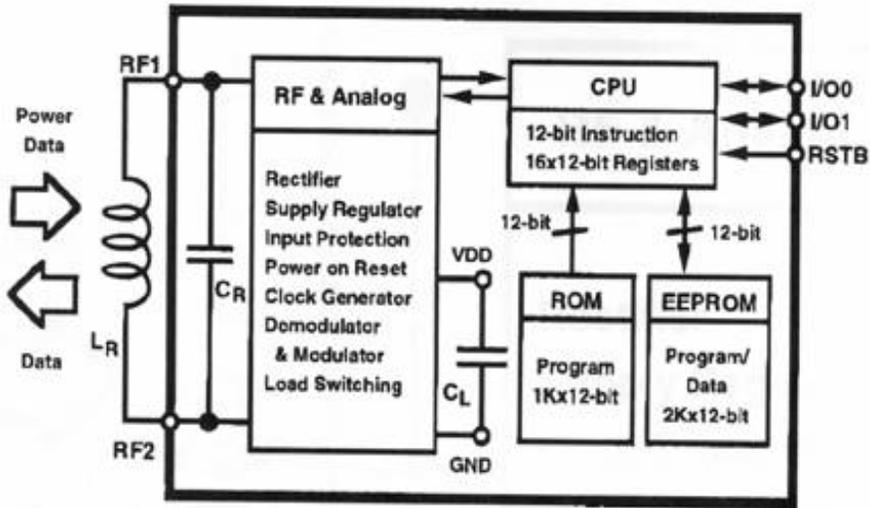


Figure 9.1.1: RFID transponder IC block diagram.

(212/106Kbps)

消費電力: 2mW @ 2.6V

全波整流回路

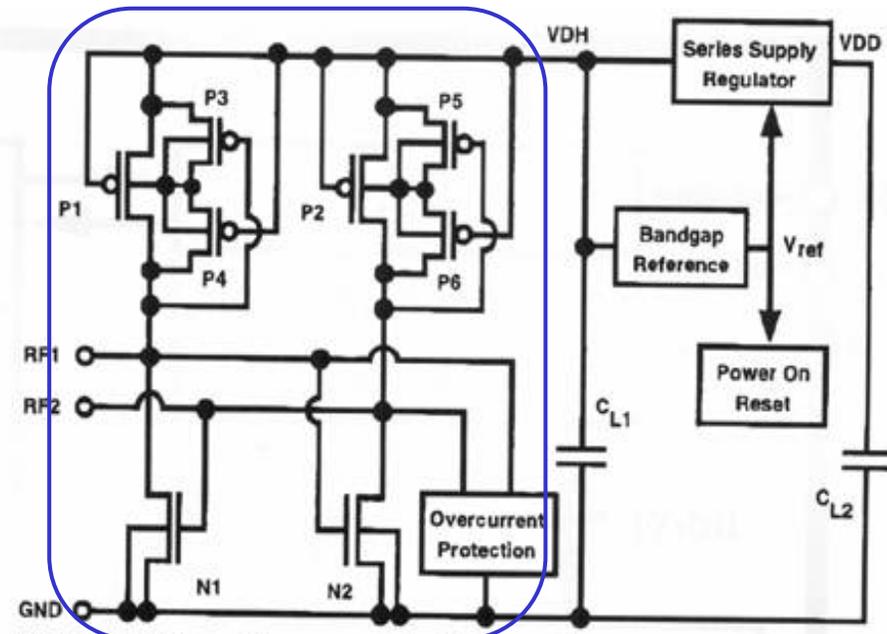


Figure 9.1.2: Power control circuit.

S. Masui, et al., ISSCC 1999, TA9.1

データの送受信回路とクロック発生回路

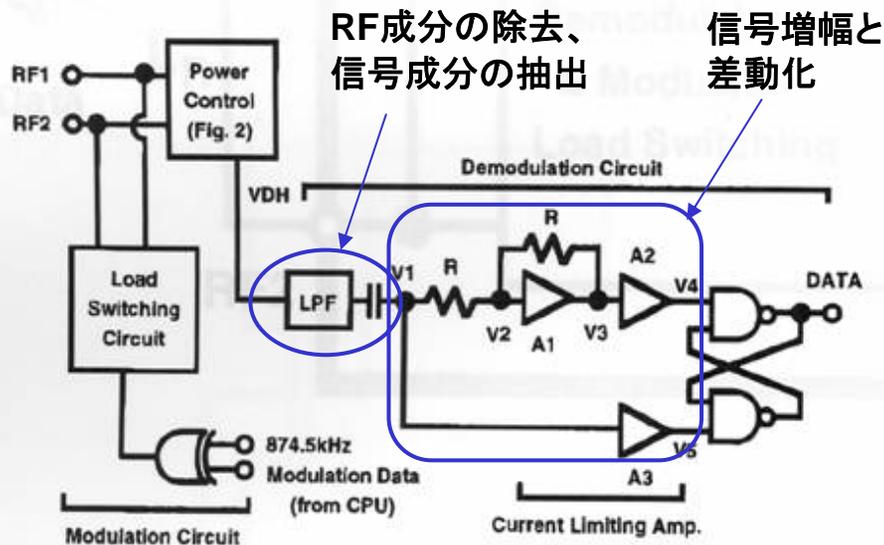


Figure 9.1.3: Data communication circuit.

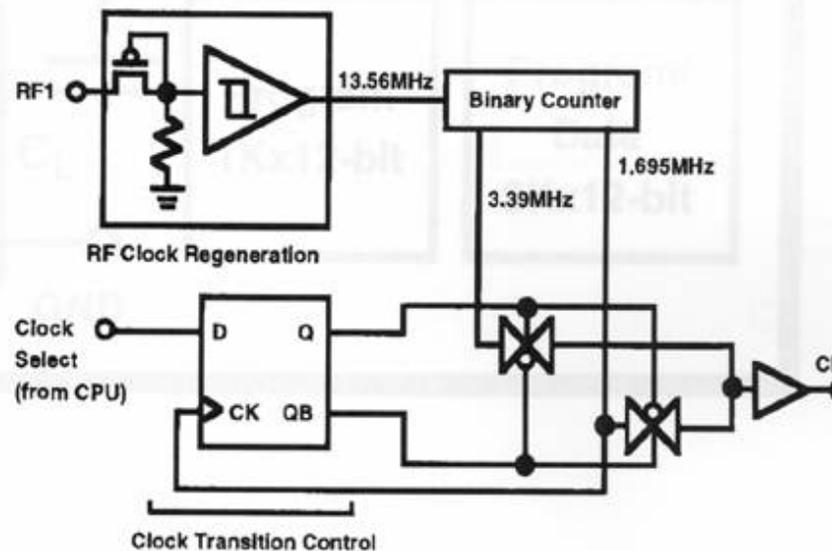


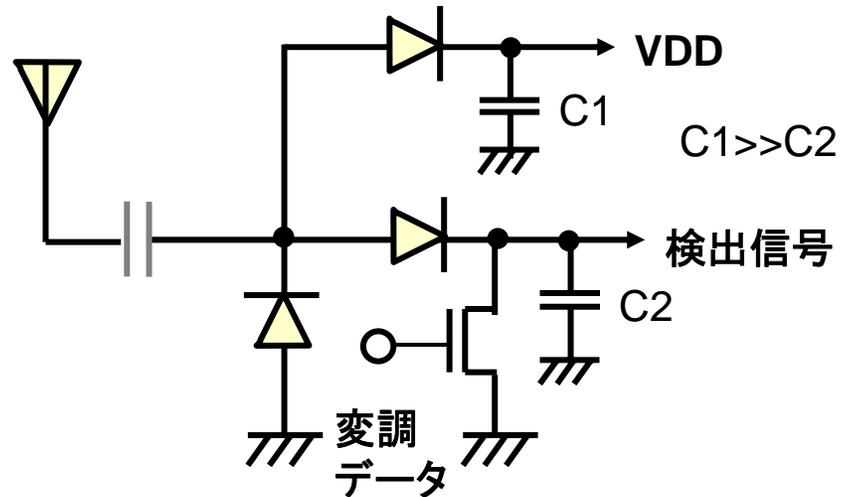
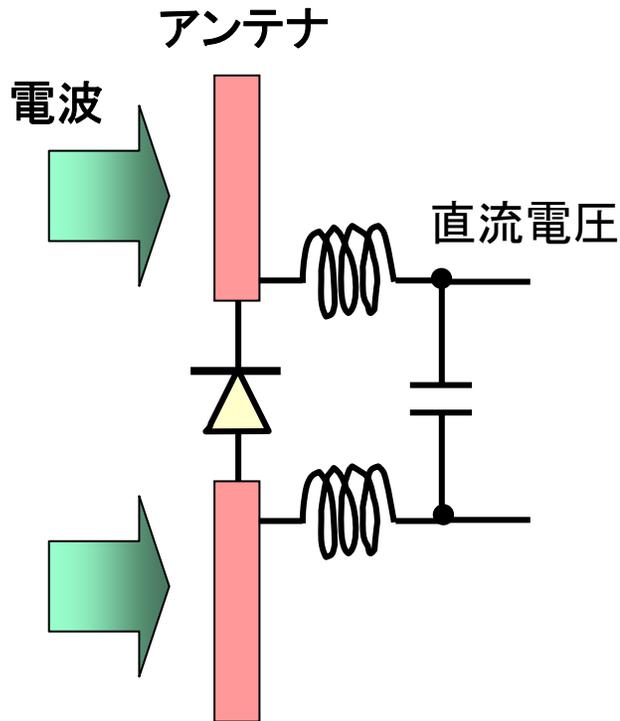
Figure 9.1.4: Clock frequency control circuit.

S. Masui, et al., ISSCC 1999, TA9.1

キャリアを分周してクロックを発生
クロック周波数を変えることでパワーコントロール
(2.45GHzでは非現実的)

電源再生回路

アンテナに整流回路を設けて電源を再生する。
インピーダンスマッチングが難しい。



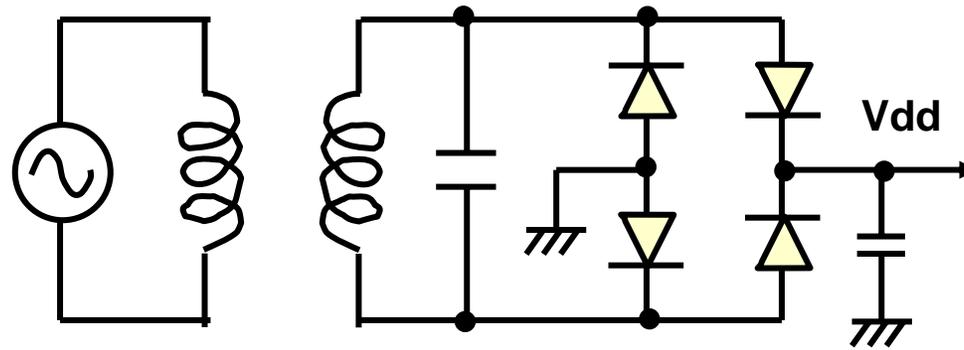
S. Tanaka, et al., 1998 Symp. on VLSI Circuits
Digest of Technical Papers, pp. 230-231.

Rectenna=Rectifier+Antenna

実際の回路の一例

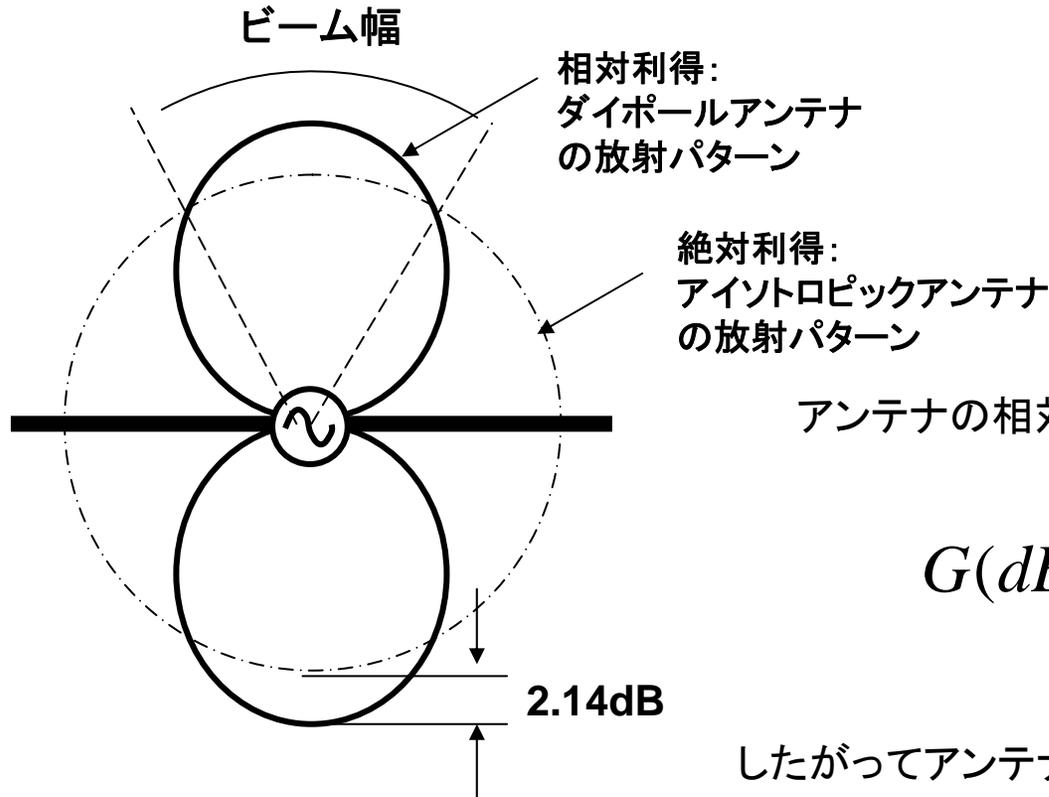
全波整流回路

電力再生効率を上げるには全波整流回路の使用が望ましい。



全波整流回路

アンテナの利得



アンテナの相対利得 G とアンテナの最大外形寸法 L は

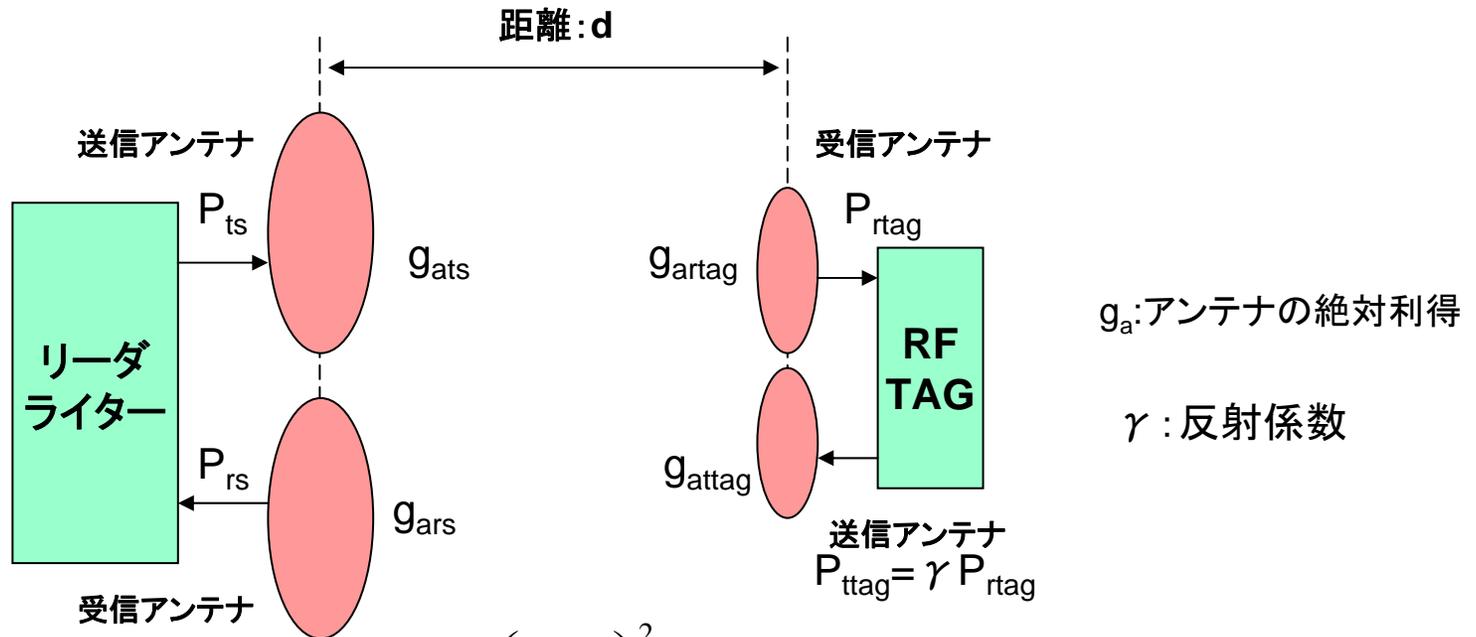
$$G(\text{dBd}) \approx 8 \log \frac{2L}{\lambda}$$

したがってアンテナが小さくてもあまり利得には効かない。

受信電力

TAGの受信電力は(波長/距離)²に比例し、リーダのそれは(波長/距離)⁴に比例する。

距離が2倍離れるとリーダでの受信電力は16分の1になる。



TAGの受信電力:

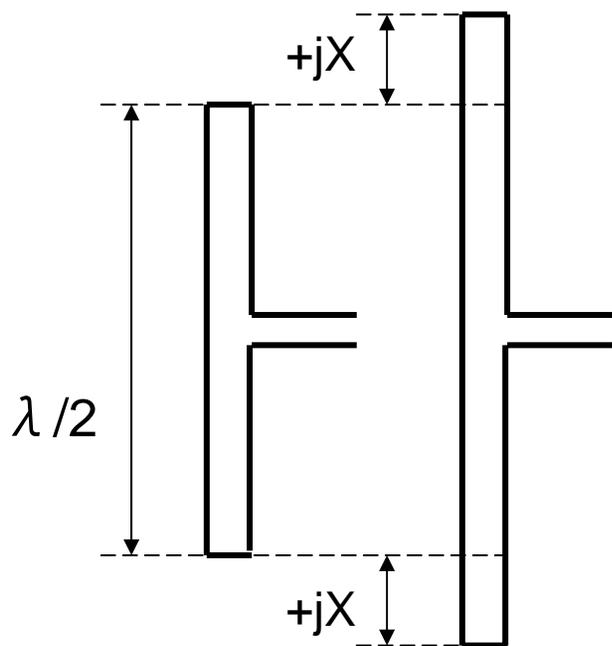
$$P_{rtag} = P_{ts} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot g_{ats} \cdot g_{artag}$$

リーダの受信電力:

$$P_{ttag} = \gamma \cdot P_{ts} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^4 \cdot g_{ats} \cdot g_{artag} \cdot g_{attag} \cdot g_{ars}$$

アンテナのTAGチップのインピーダンス整合

TAGのRF入力とアンテナとのインピーダンス整合を取る必要がある

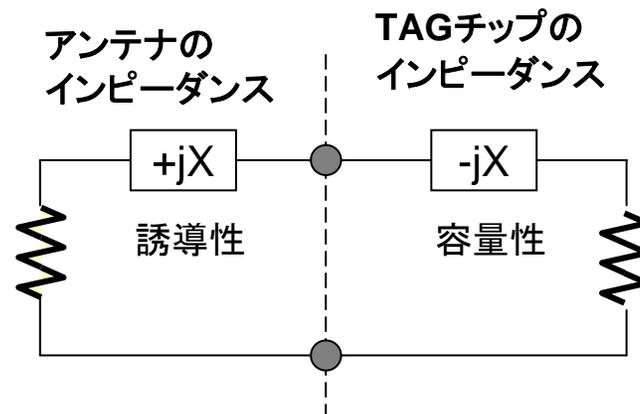


$$Z_a = R_a$$

$$Z_a = R_a + jX$$

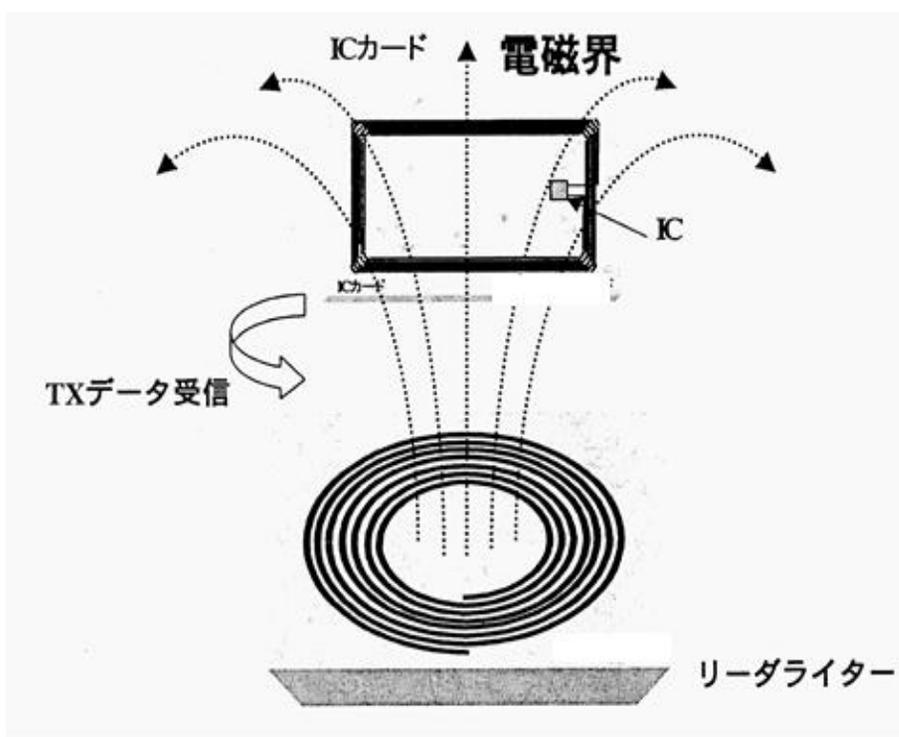
$$R_a = 300 \Omega$$

アンテナを $\lambda/2$ よりも長くするとインダクティブになる
これを用いてTAGのリアクティブな入力インピーダンスと整合を取る



折り返しダイポールアンテナ

コイルによる電力の伝送



数100MHz以下の周波数では $\lambda/2$ のアンテナを用いることは困難である。

このような場合、コイルの電磁誘導を用いる。

起電力 v は信号源の電流 I と相互インダクタンス M を用いて、

$$v = -\frac{d\phi}{dt} = j\omega M_{12}I$$

結合係数 k を用いると $M_{12} = k\sqrt{L_1L_2}$

半径 a の断面を持つ、巻き数 n 、平均半径 R の環状線の自己インダクタンス L は、

$$L = n^2 R \left\{ \mu_0 \left(\log \frac{8R}{a} - 2 \right) + \frac{\mu}{4} \right\}$$

コイルアンテナの結合係数

コイルの結合係数は距離を離すと急激に劣化する

円形コイル1: 半径: a, 巻き数: n1
円形コイル2: 半径: b, 巻き数: n2
距離: d

$$M_{12} = \mu_0 n_1 n_2 \sqrt{ab} \left\{ \left(\frac{2}{k} - k \right) K(\kappa) - \frac{2}{k} E(\kappa) \right\}$$

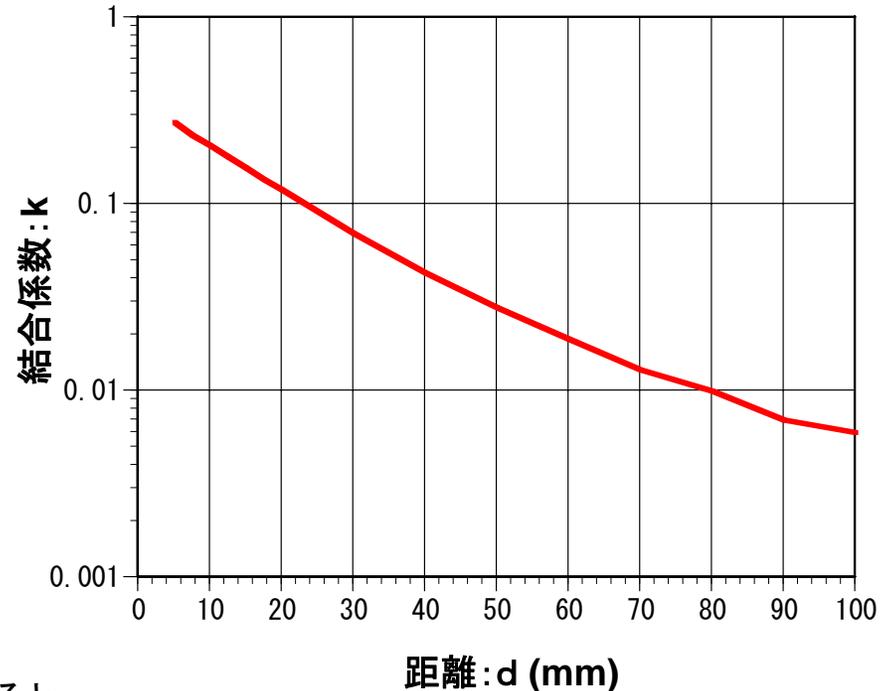
$$\kappa^2 = \frac{4ab}{(a+b)^2 + d^2}$$

$$K(\kappa) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$E(\kappa) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$$

結合係数k(上の式のkと異なることに注意)を用いると

$$M_{12} = k \sqrt{L_1 L_2}$$

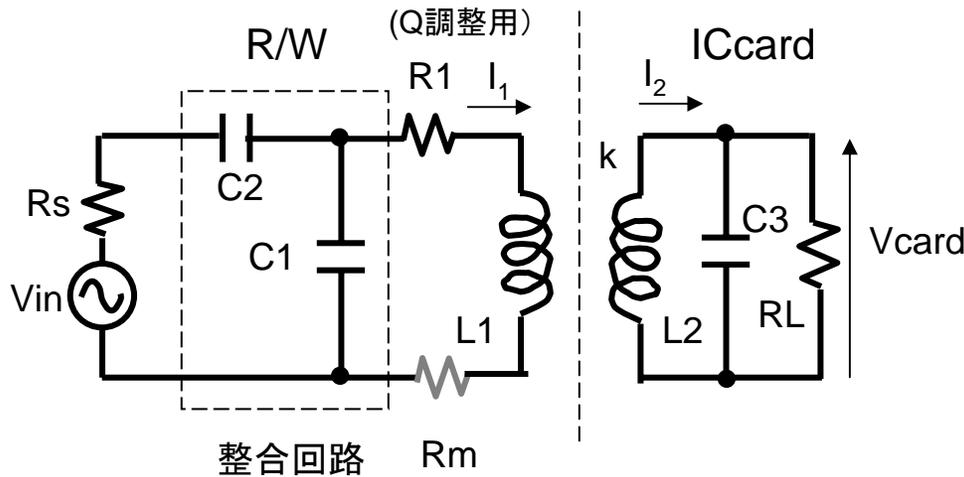


R/Wコイル: 4ターン
アンテナコイル: 4ターン
カードサイズ: 85.6mm x 54 mm

コイルを用いた電力と情報伝送

コイルの結合により電力を伝送できるが、伝送量は結合係数 k の2乗に比例する。
 →距離が遠くなると急激に減少する。

負荷側からの起電力を用いて、カード側の負荷を変えることによりカード側の情報をR/W側に伝えることができる。

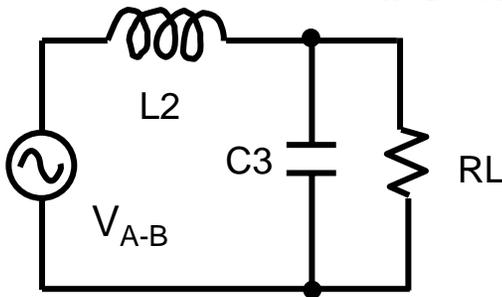


$$P_{card} = \left(\frac{M}{L_2} \right)^2 I_1^2 R_L = k^2 \frac{L_1}{L_2} I_1^2 R_L$$

例えば $M=0.1\mu\text{H}$, $L_2=3\mu\text{H}$, $R_L=1\text{k}\Omega$, $I_1=0.2\text{A}$ とすると
 カードが受信できる電力は44mW

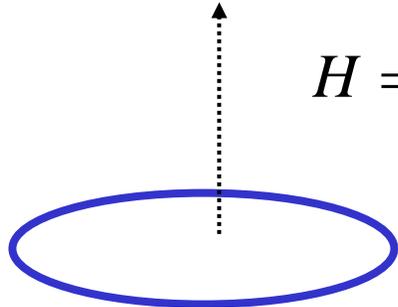
$$R_m = \left(\frac{M}{L_2} \right)^2 R_L \quad (I_2 \text{により発生した等価抵抗})$$

$$V_{A-B} = sMI_1 = j\omega MI_1$$

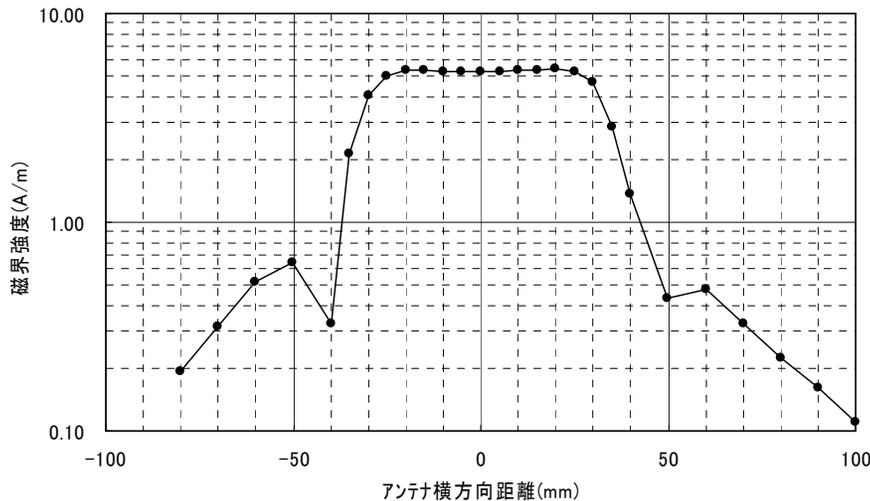
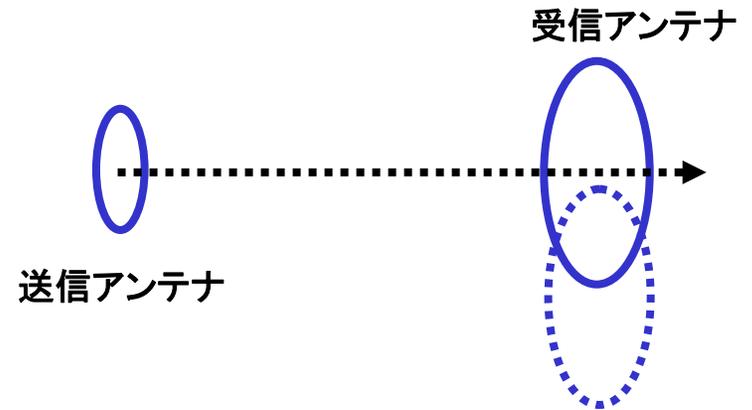


カード側の負荷を変えることでR/W側の電流に影響を及ぼす。
 →カード側の情報をR/W側に伝えることができる。

コイルの磁界強度


$$H = \frac{na^2I}{2(a^2 + x^2)^{3/2}}$$

H:磁界強度
n:巻き数
a:半径
x:中心からの距離



横方向の磁界強度特性

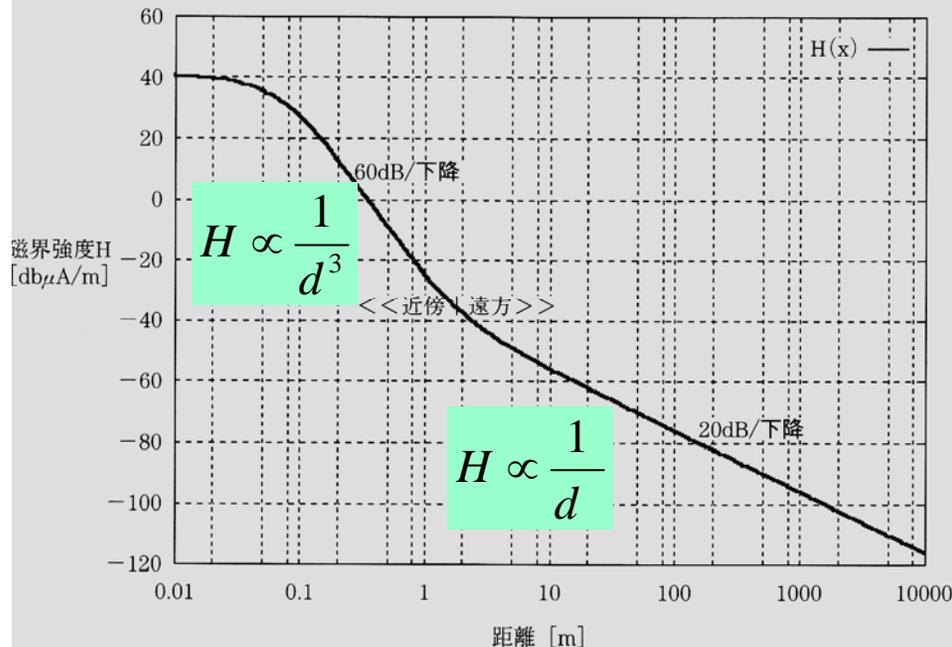
磁界強度(H)は距離の3乗
($x \gg a$)に比例して減少

$a=0.5\text{cm}$ $x=10\text{cm}$ で1/10000に

近傍電磁界と遠方電磁界

電磁界には近傍電磁界と遠方電磁界があり、距離は波長の約1/6が境界である。
近傍電磁界では磁界は距離の3乗に比例して急激に弱まるが、遠方電磁界では距離に比例して弱まる。

近傍から遠方界の変化



近傍電磁界 (誘導電磁界)

磁界が支配的

$$d < \frac{\lambda}{2\pi}$$

$$H \propto \frac{1}{d^3}$$

遠方電磁界 (放射電磁界)

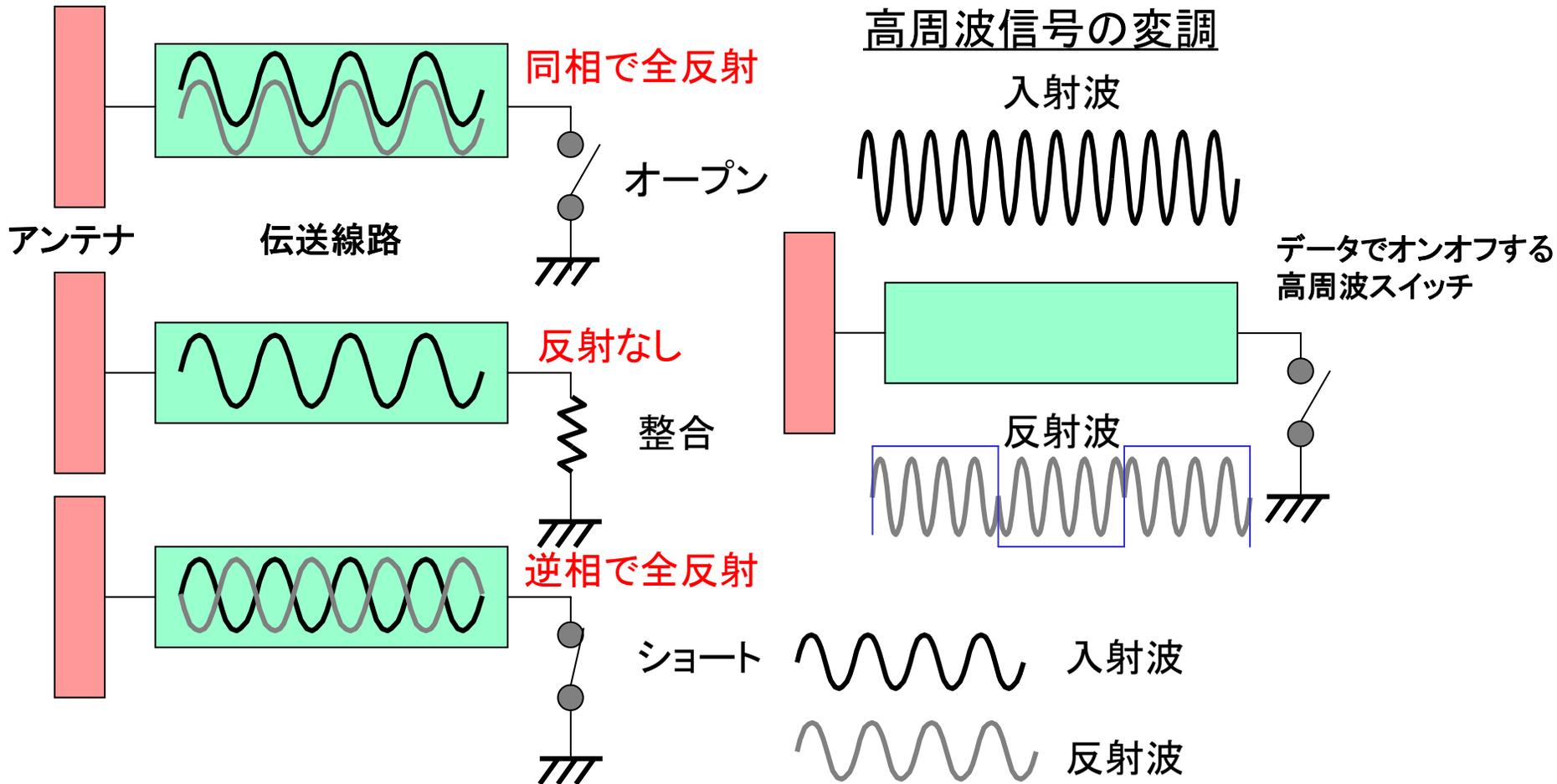
磁界と誘導電界が相互作用により電波として伝わる

$$d > \frac{\lambda}{2\pi}$$

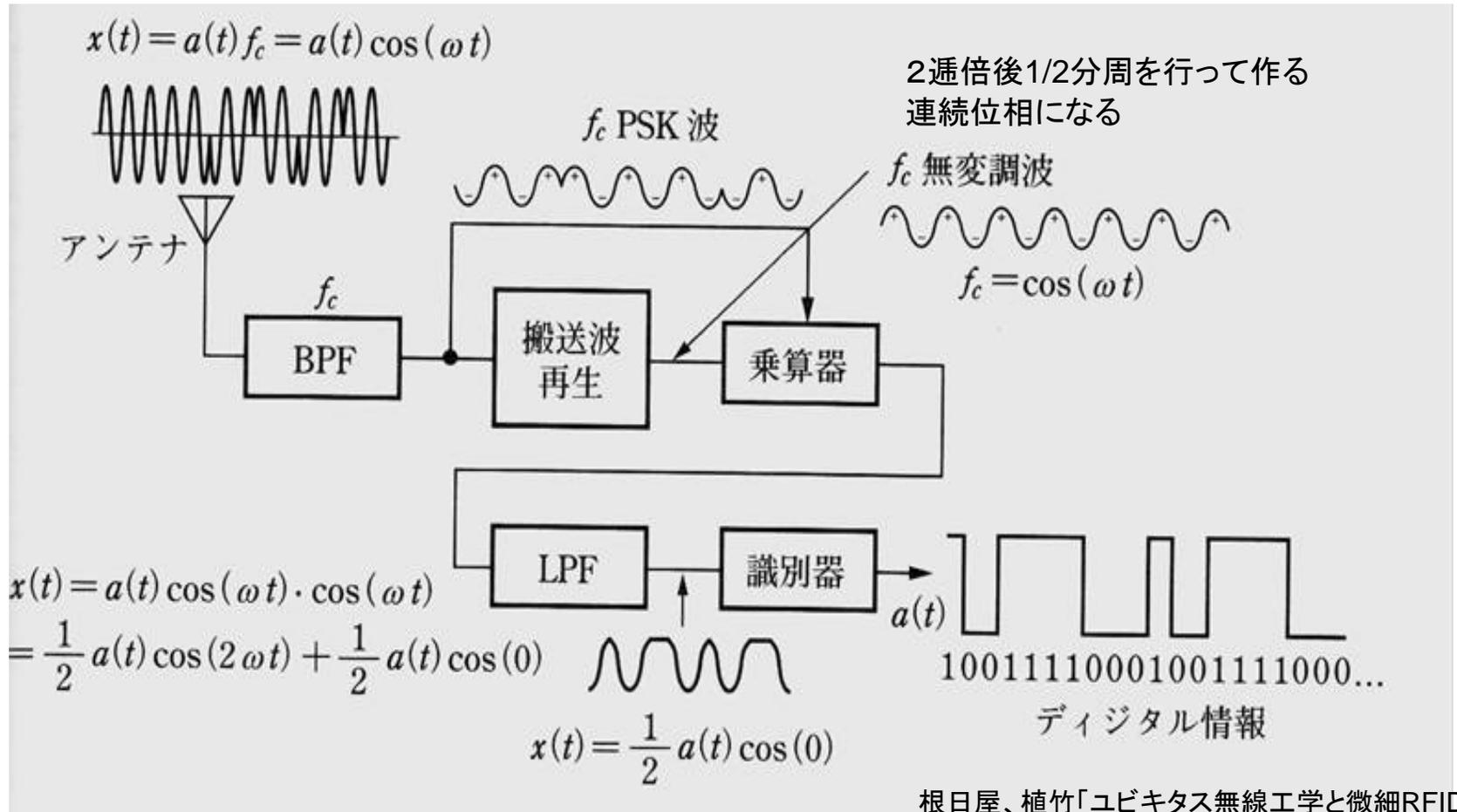
$$H \propto \frac{1}{d}$$

信号の送信

通常のRF-TAGではデータにより高周波スイッチをオンオフさせることで反射波の位相を反転してPSK信号を送信することや反射係数を変化させて振幅を変化させるASK変調が用いられる。



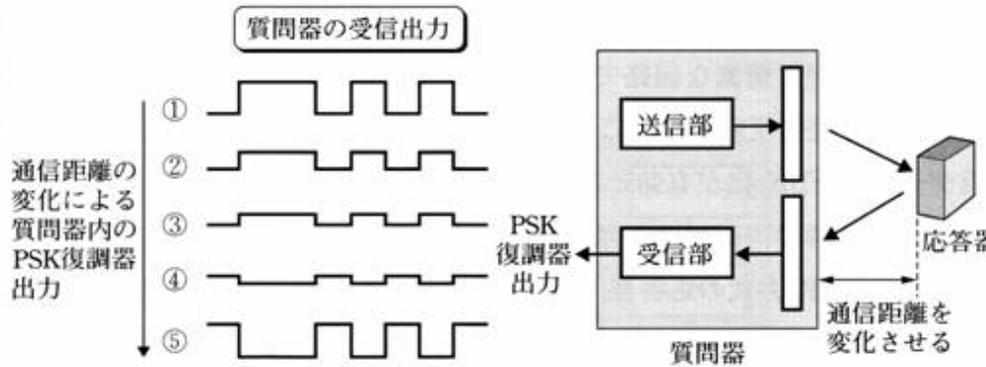
PSK波の復調



根日屋、植竹「ユビキタス無線工学と微細RFID」
東京電機大学出版局, pp150-161,

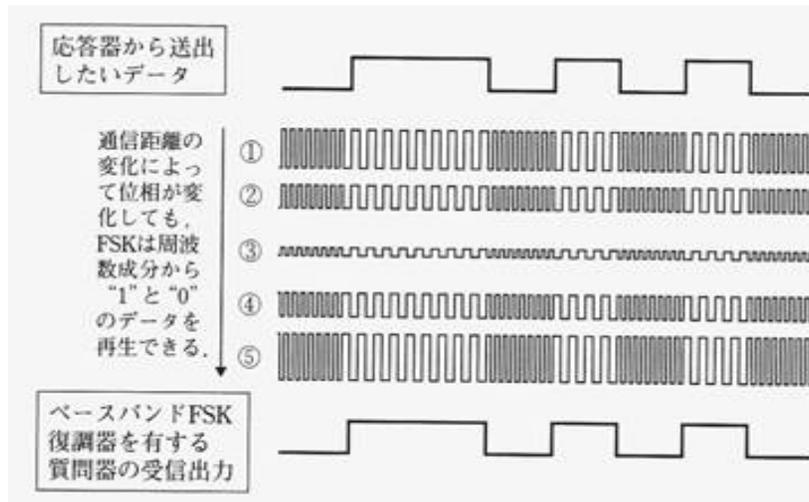
変調方式

1) PSK方式



PSK方式では通信距離が $\lambda/4$ 変化することにより極性が反転してしまう。
また、情報パターンによりDCレベルが変化する。

2) ベースバンドFSK方式



ベースバンドFSK方式ではこの課題が回避できる。

根日屋、植竹「ユビキタス無線工学と微細RFID」
東京電機大学出版局, pp150-161,

電池と、自然エネルギーを用いた電源

アルカリ系ボタン電池の特性

カードなどに搭載できる薄型電池は酸化銀電池、空気亜鉛電池、リチウムコイン電池などがある。

いずれも標準負荷電流や公称容量が極めて小さい

酸化銀電池

電池の仕様の一例

公称電圧 (V)	公称容量 (mAh)	標準負荷 (mA)	直径 (mm)	高さ (mm)	最大負荷 (mA)	
1.55	22.5	0.03	5.8	2.7	-	
1.55	12	-	4.8	2.15	0.8	
1.55V	12.5	0.02	4.8	2.15	-	
1.55	12	0.02	4.8	2.15	-	(20uA動作で1ヶ月弱)

空気亜鉛電池

1.4	75	0.43	5.8	3.6	-
-----	----	------	-----	-----	---

リチウムコイン電池

1.2	2.3	0.003	4.8	2.1	-
-----	-----	-------	-----	-----	---

ユビキタス電源

さまざまな「自給自足」型電源がすでに使用されている。

日経エレクトロニクス
2003. 6. 9, pp. 107

製品化済み

(a) 小型太陽電池で携帯型ゲーム機が動く



(c) 発電機構をラジオに内蔵



(b) ルーアの動きでLEDが点灯



(d) 車が通過するときの風力でLEDを点灯



(e) 足踏みで25W~50Wを発電



技術開発品

(f) 熱電変換素子で発電して
微弱無線でデータを送信



(g) 服の重みで発電



試作品

図1 実はもう身近に迫る「ユビキタス電源」

携帯機器の消費電力と発電機構の出力

手回し型発電(3W)でもかなりの携帯型電子機器が動作可能である

日経エレクトロニクス
2003. 6. 9, pp. 108

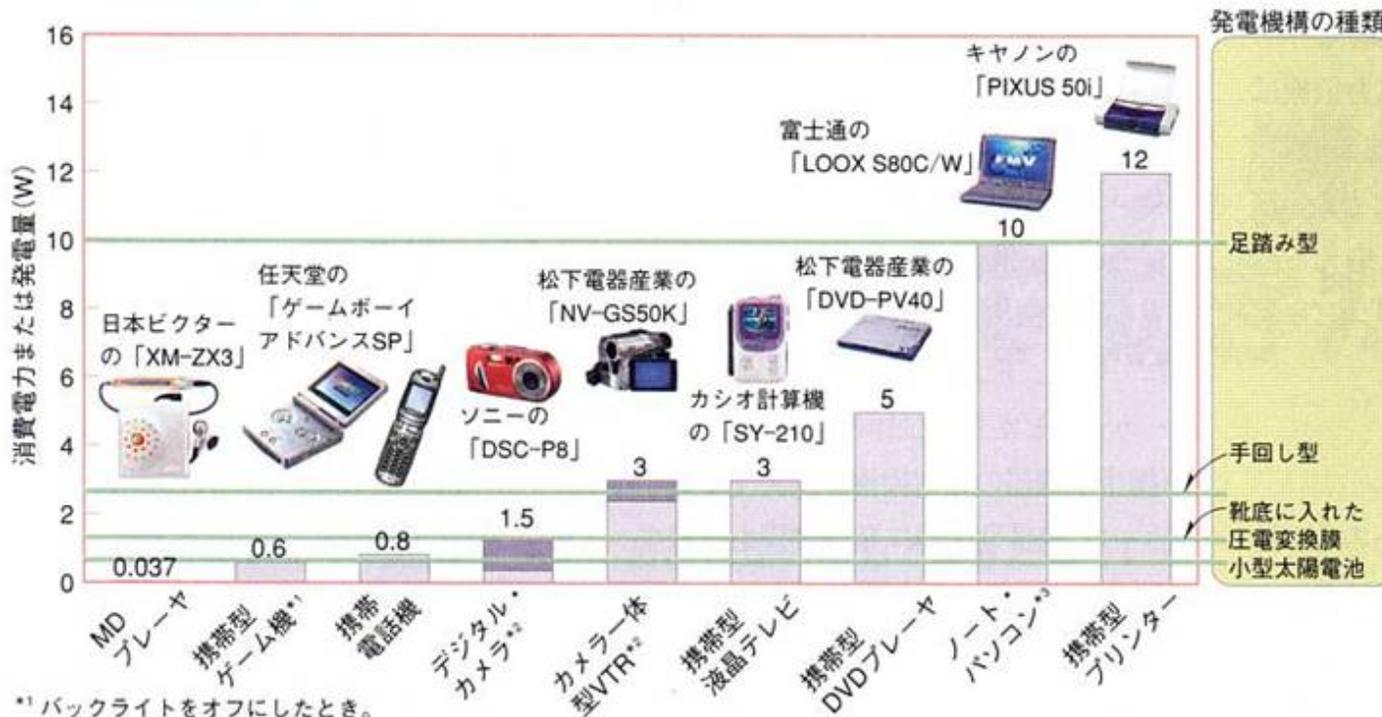


図2 携帯型機器の消費電力と発電機構の出力

電池やACアダプタなしでも駆動できるエレクトロニクス機器は、思った以上に多い。小型の足踏み発電機であれば、ノートパソコンも動かせる。図中に消費電力を例示した機種は、各製品分野で消費電力が公開されているものから選んだ。発電機構の数値は、各方式のうち出力が大きい製品や試作品を選んだ。なお、この図では機器の標準的な消費電力と発電機の最大出力を比較しており、発電機の出力電圧や同電流値、変動幅などが機器の要求値に満たない場合もある。

*1 バックライトをオフにしたとき。

*2 液晶モニタをオンの状態で使った場合。液晶モニタをオフにするとデジタルカメラは0.4W、カメラ一体型VTRは2.1Wまで下がる。

*3 ACアダプタを使った場合の標準時の値。最大時は約43Wになる。

温度差発電を用いた携帯情報端末

Getting energy from temperature difference



Using heat of a hand



Using cold water

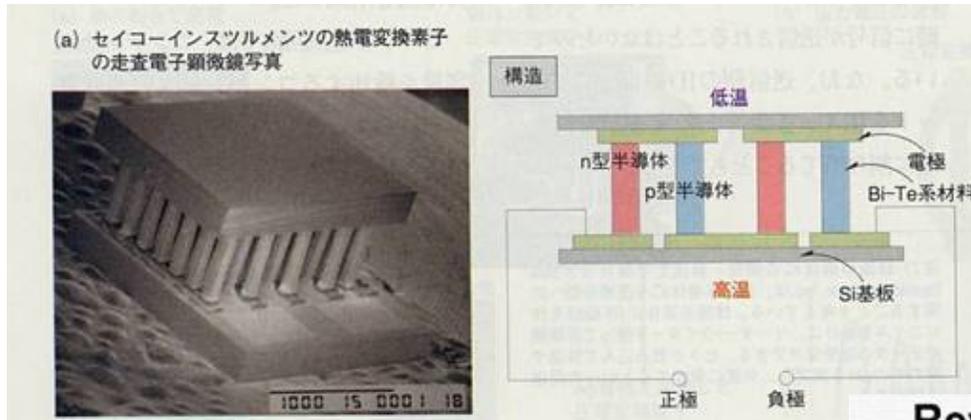
Bi-Te based thermoelectric converter

Battery-less wireless signal transmission using temperature difference

ISSCC2003,
Douseki, et al.,

- 1.7mW/ 0.7Vを発電
- 1Vへ変換

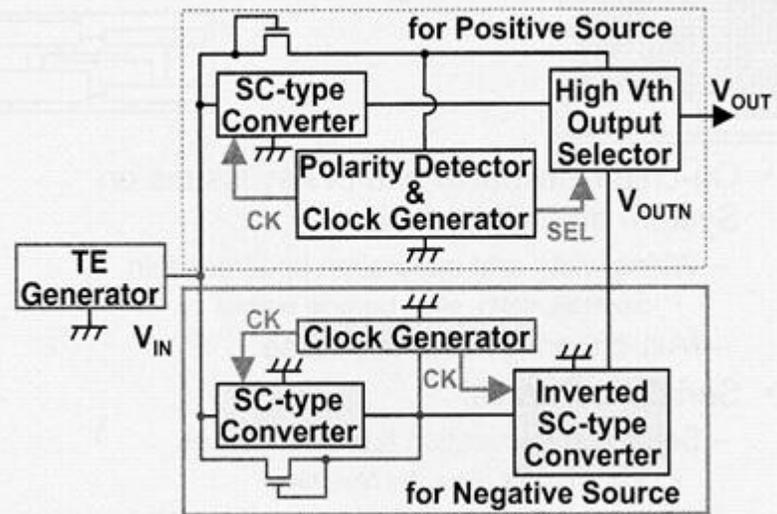
熱電交換素子と両極電源



日経エレクトロニクス
2003. 6. 9, pp. 120

両極性電源回路

Reversible-power-source Converter



$V_{IN} < 0$: Boosting Operation

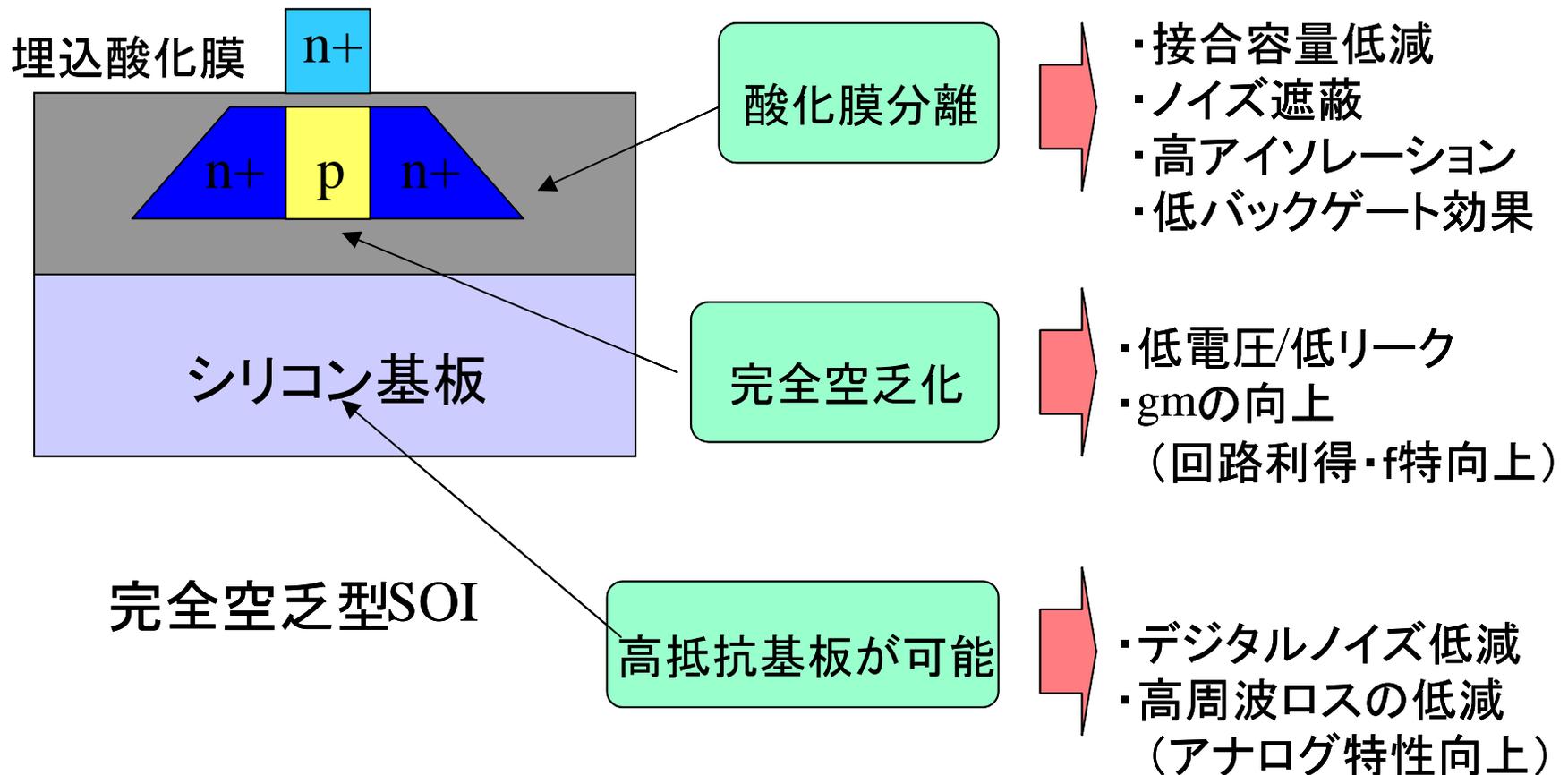
1度の温度差で 0.2V, 10uWが得られる

SOIは絶縁構造のためラッチアップなどの心配がな

FD-SOIを用いた低電圧・低電力 アナログ回路技術

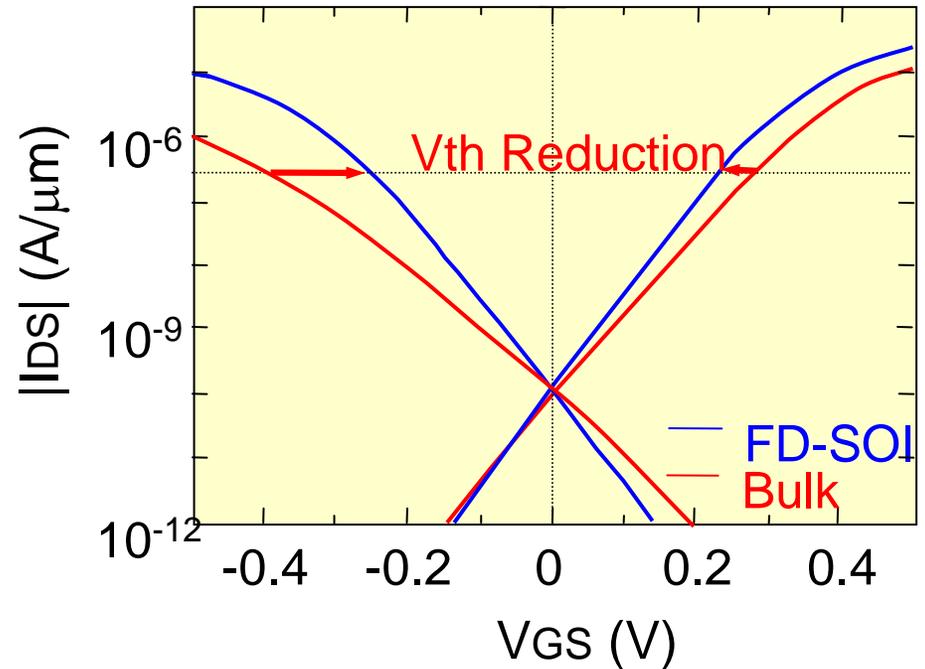
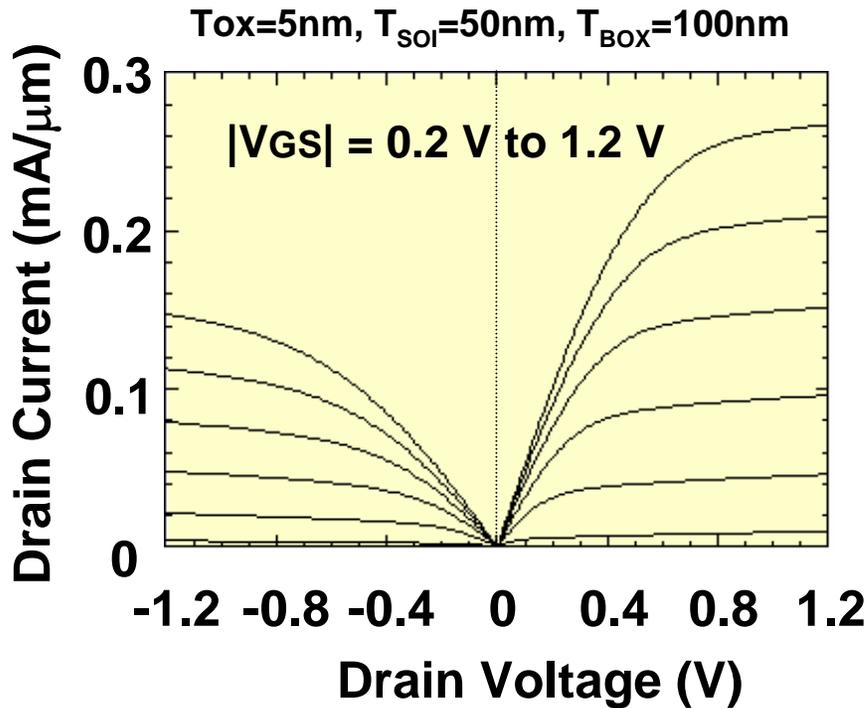
FD-SOIのアナログ応用

FD-SOIは低電圧・高周波アナログ回路に適している



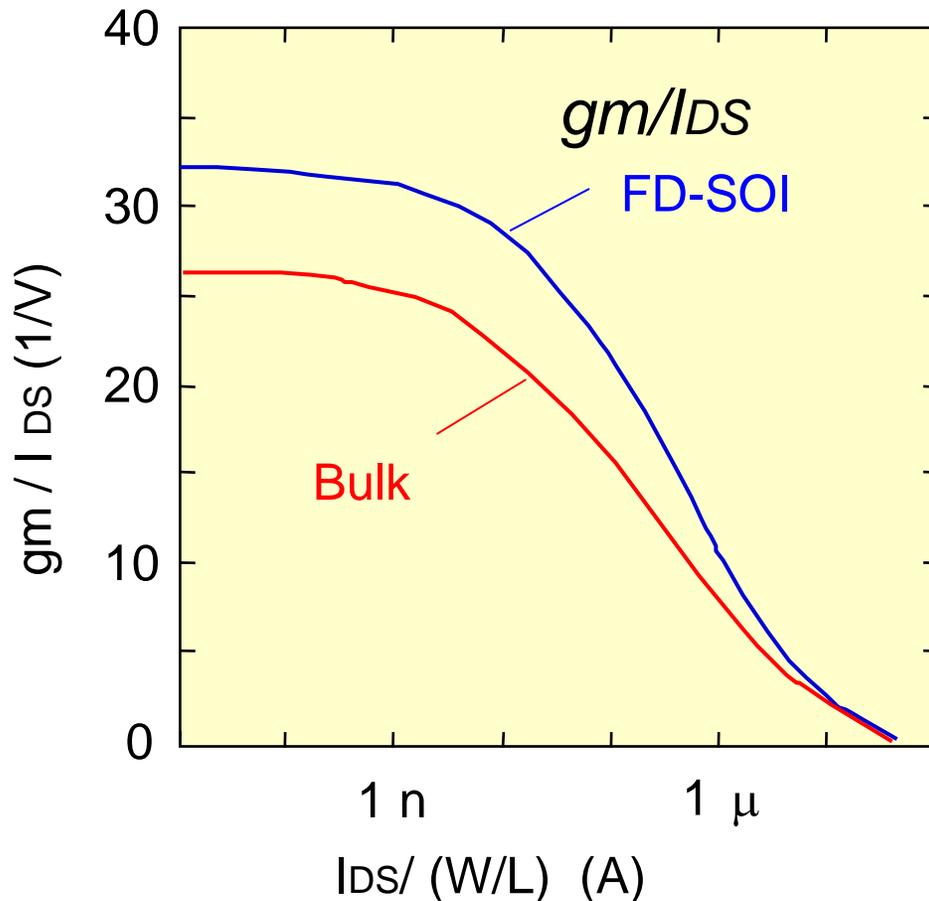
FD-SOIの電圧・電流特性

- ・リークの増加無しにしきい値電圧を下げれる → 低電圧動作
- ・サブスレッショルド特性が立っている → 低電流動作



gm/Ids 特性

FD-SOIは低電流領域でgm/Idsが25%程度大きい → 低電流動作が可能



$$\frac{gm}{Id_s} = \frac{1}{nU_T} \frac{1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{Id_s}{I_{sw}}}\right)}{\sqrt{\frac{Id_s}{I_{sw}}}}$$

$$I_{sw} = 2n\mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) U_T^2$$

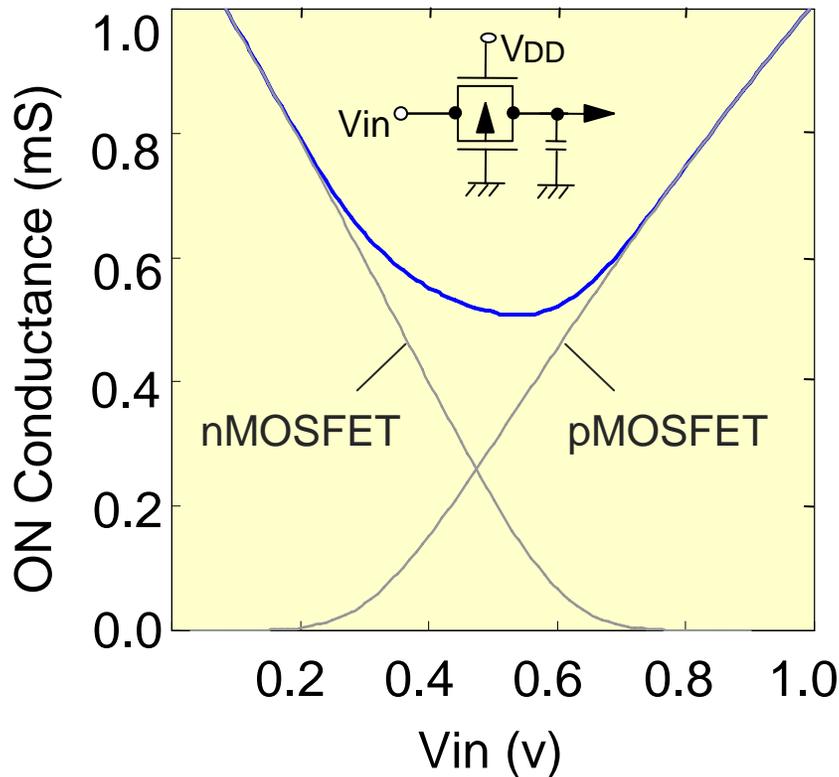
$$n = \begin{cases} 1.4 & \text{(Bulk)} \\ 1.1 & \text{(FD-SOI)} \end{cases}$$

$$n = \left(1 + \frac{C_d}{C_{ox}}\right)$$

低電圧アナログスイッチ特性

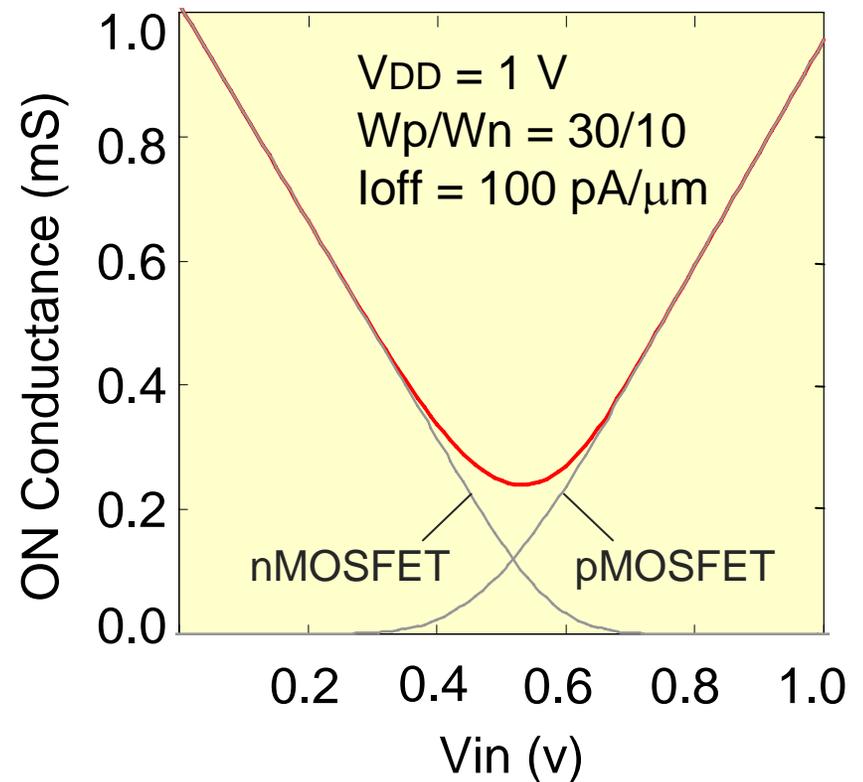
- ・低電圧にてより大きなオンコンダクタンスが得られる
- ・オンコンダクタンスの入力電圧依存性が小さい

FD-SOI



低い V_T と小さなバックゲート効果

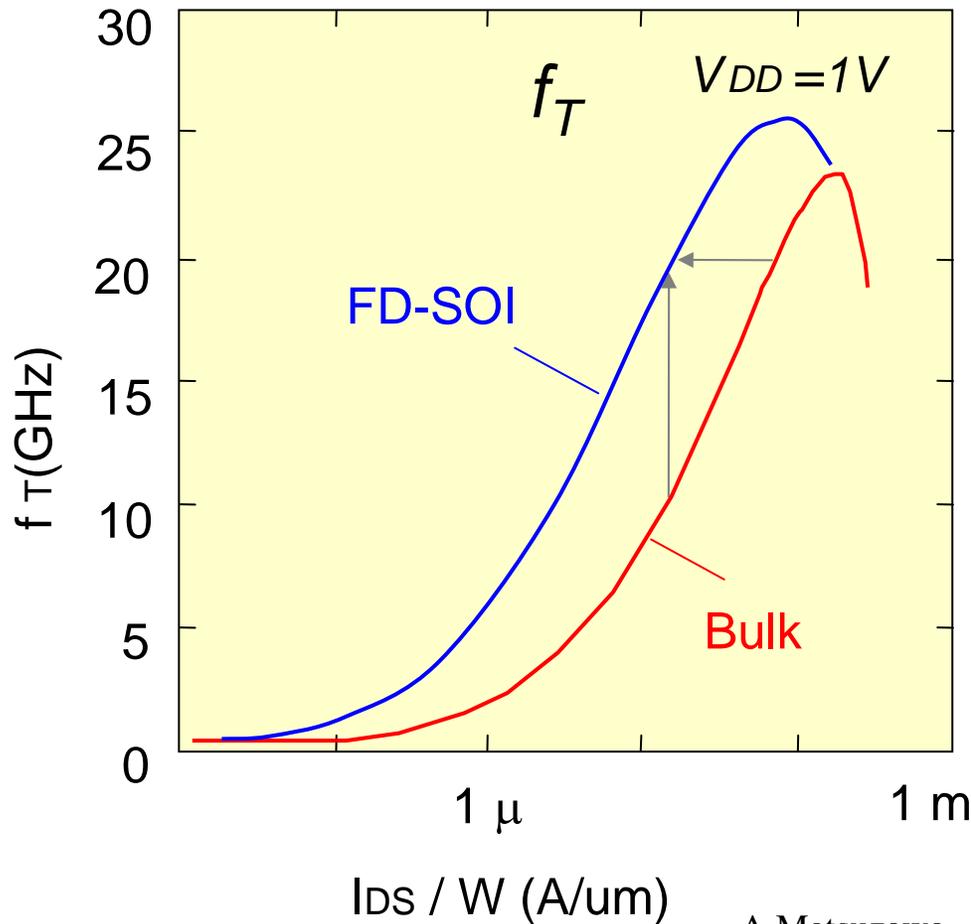
Bulk



同一リーク電流になるように V_T を調整

高周波特性: f_T

f_T のピークはバルクとほぼ同等であるが、低電流領域での f_T が高い



$$f_T = \frac{gm}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$

$$f_T \approx \frac{v_{sat}}{2\pi L}$$

Doseki, VLSI Ckt Symp. 2002.

高比抵抗基板による f_{max} and NF の改善

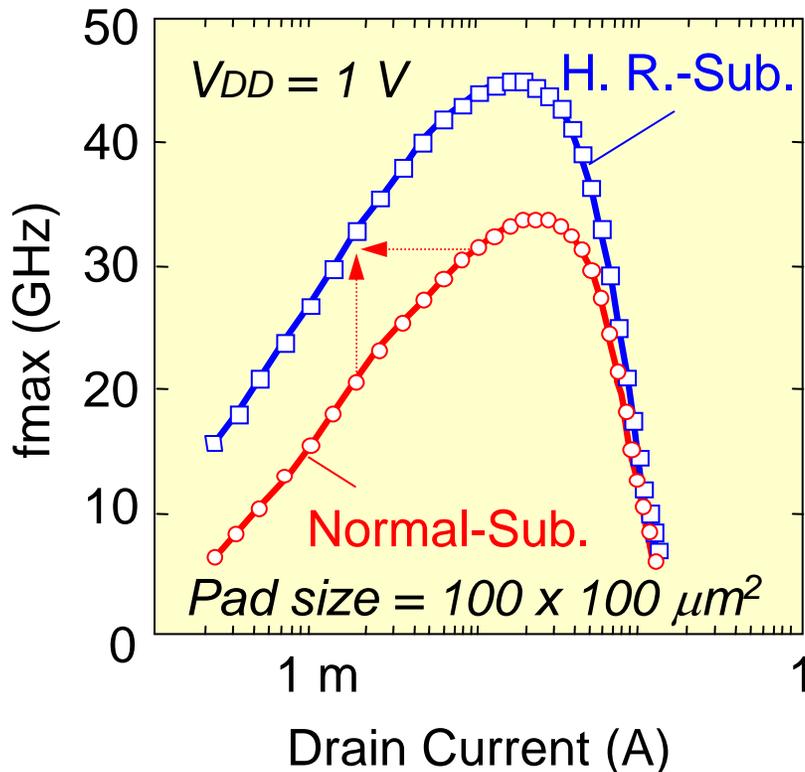
高比抵抗基板では基板での電力ロスが少ないため f_{max} ,NFが改善される

$$f_{max} \approx \frac{f_T}{2\sqrt{r_g(g_{ds} + 2\pi f_T C_{gd})}}$$

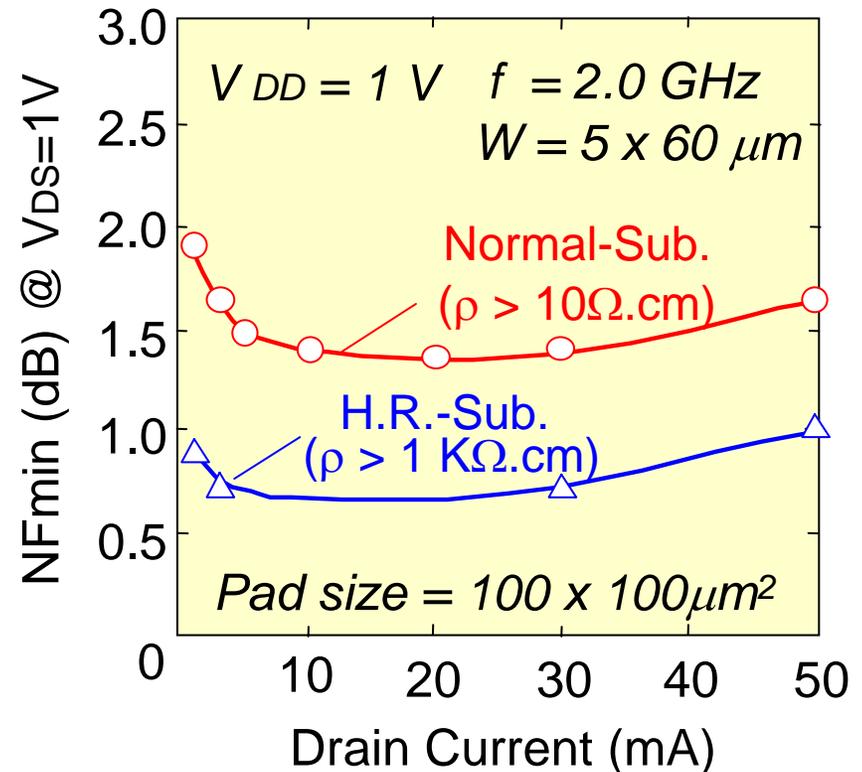
高比抵抗基板により等価的に g_{ds} が低下する

Douseki, VLSI Ckt Symp. 2002.

f_{max}



NF

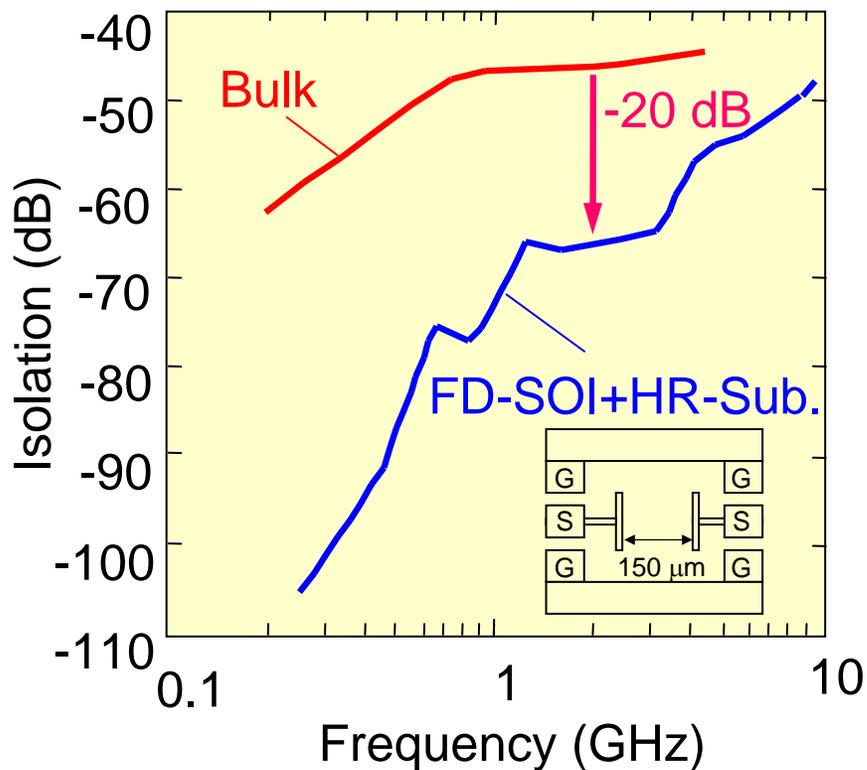


アイソレーション特性

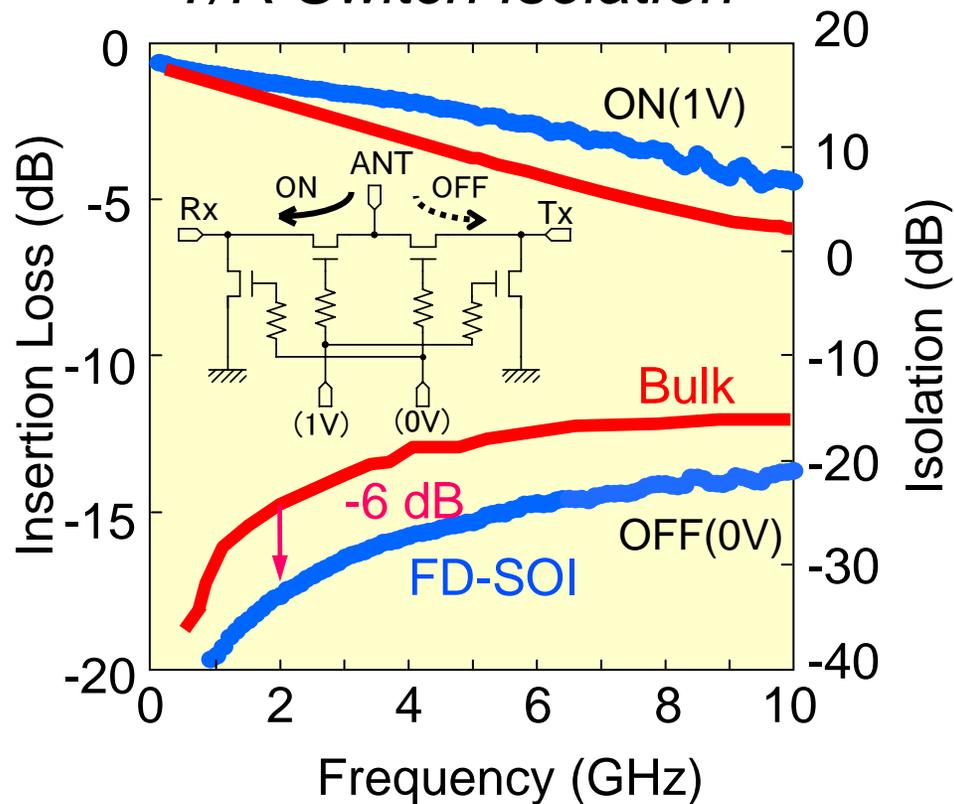
SOIは対基板容量が小さく、バルクよりもアイソレーション特性が良好
高比抵抗基板を用いることでさらに特性が向上する

Douseki, VLSI Ckt Symp. 2002.

Crosstalk



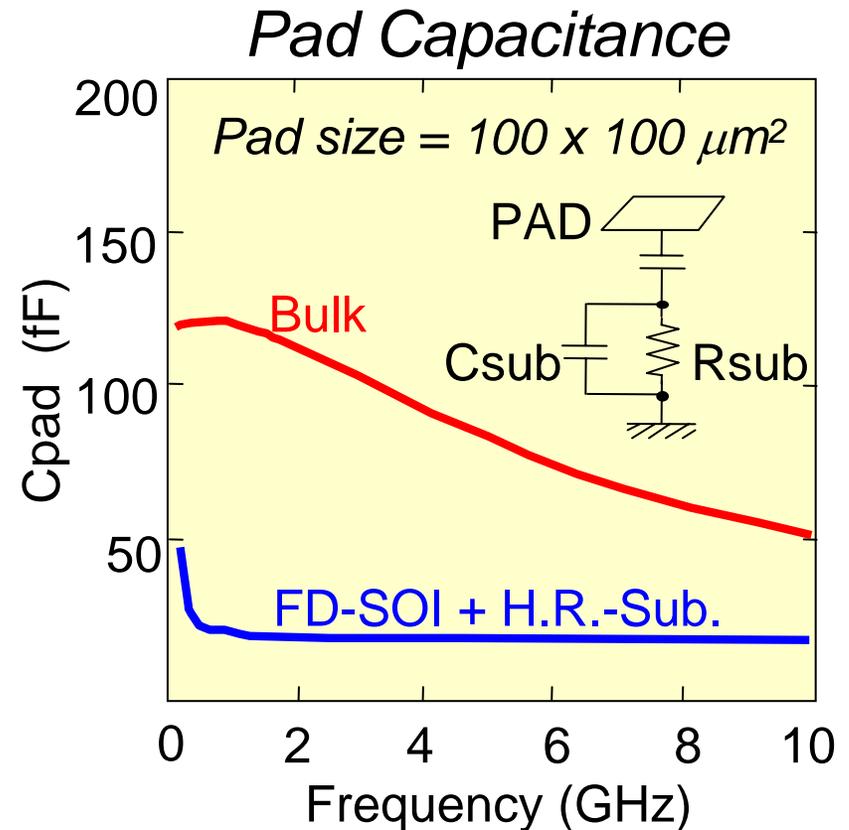
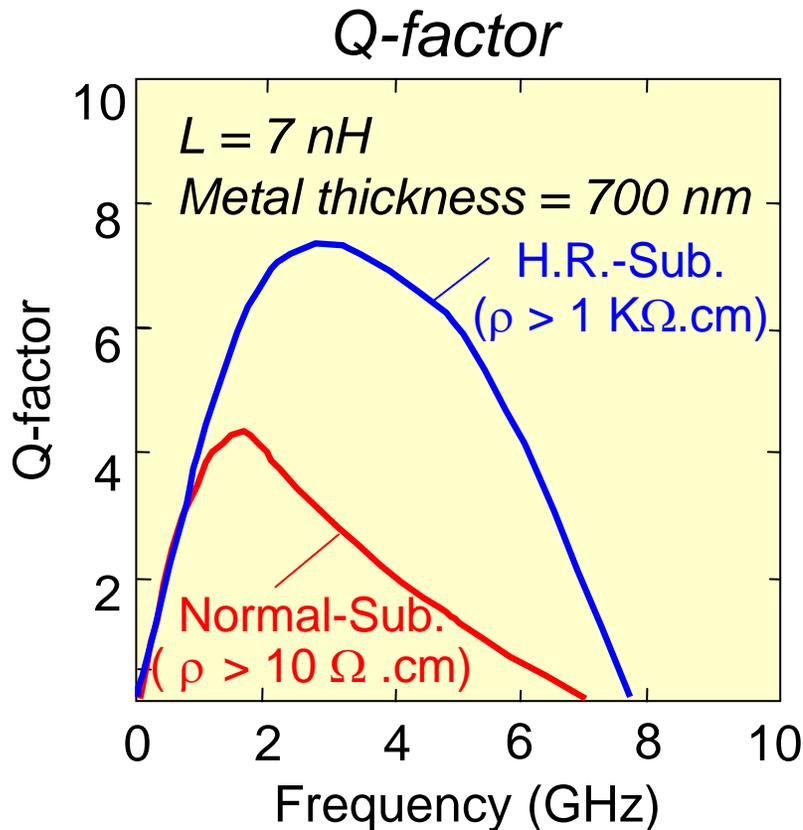
T/R Switch Isolation



高比抵抗基板の効果：インダクタのQの向上

高比抵抗基板では高周波信号の基板での損失が小さいためにインダクタのQが向上する。

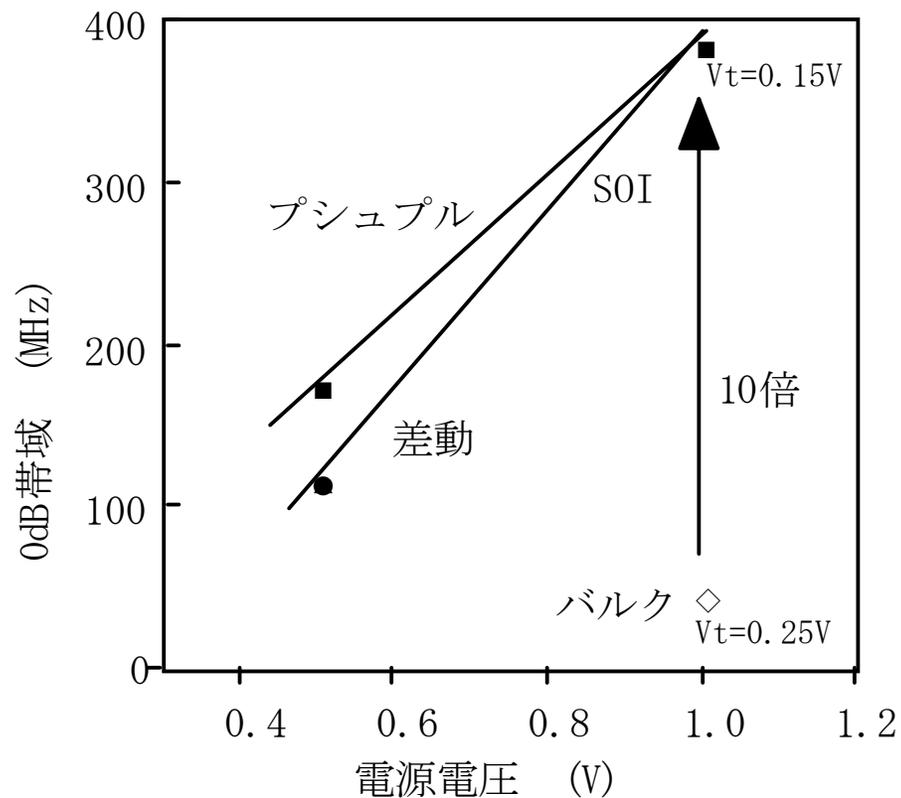
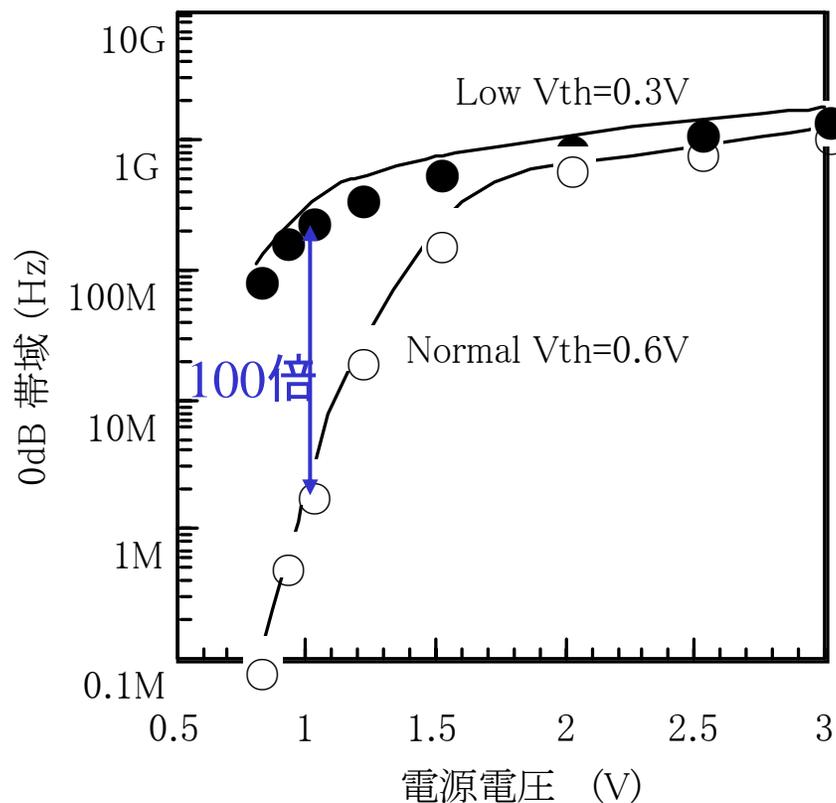
Douseki, VLSI Ckt Symp. 2002.



低電圧増幅器

・1V動作ではFD-SOIはバルクに比べ10倍のGBWが可能

- ・ V_T の低減により低電圧動作が容易に
- ・接合容量の減少

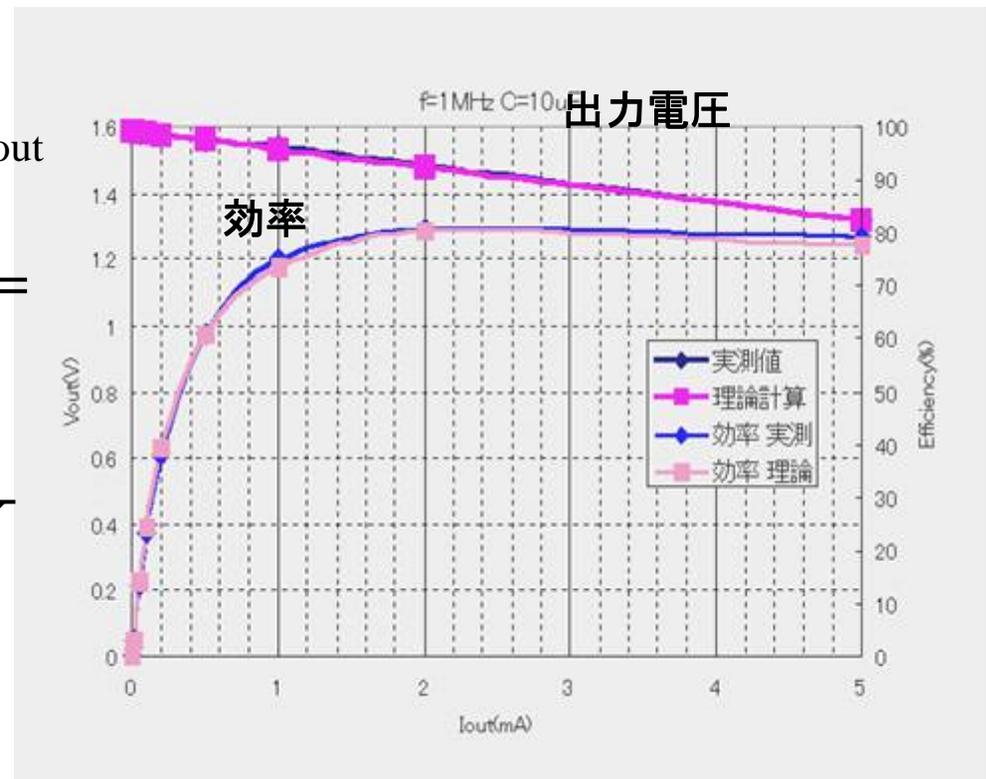
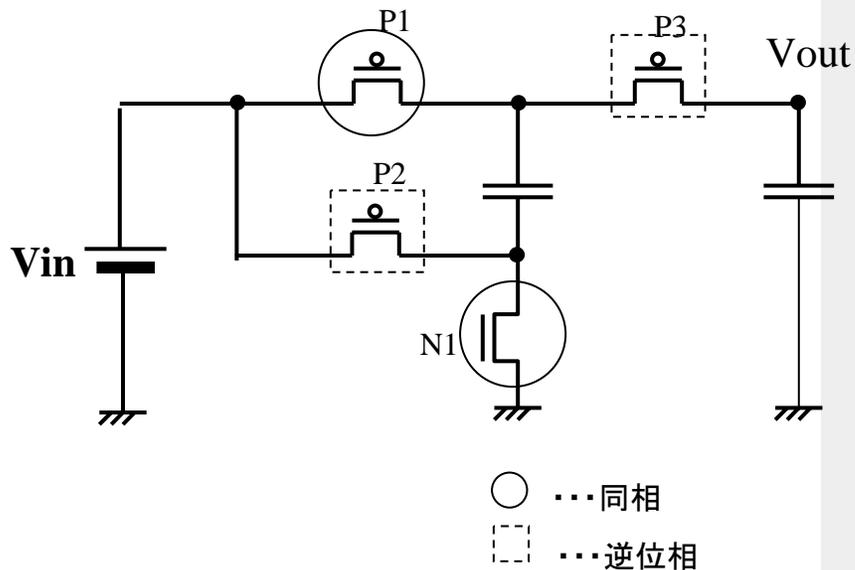


FD-SOIを用いたSCF型昇圧回路

- ・バックゲート効果が少なく理想的な出力電圧と効率が得られた
- ・ラッチアップフリーなので設計し易い

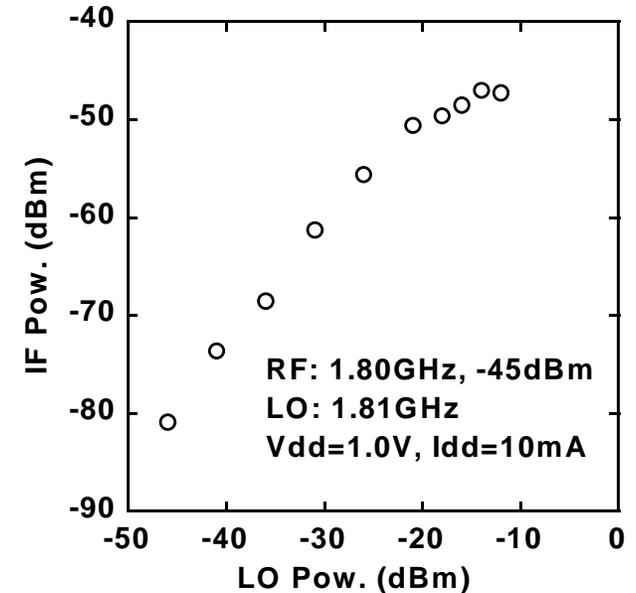
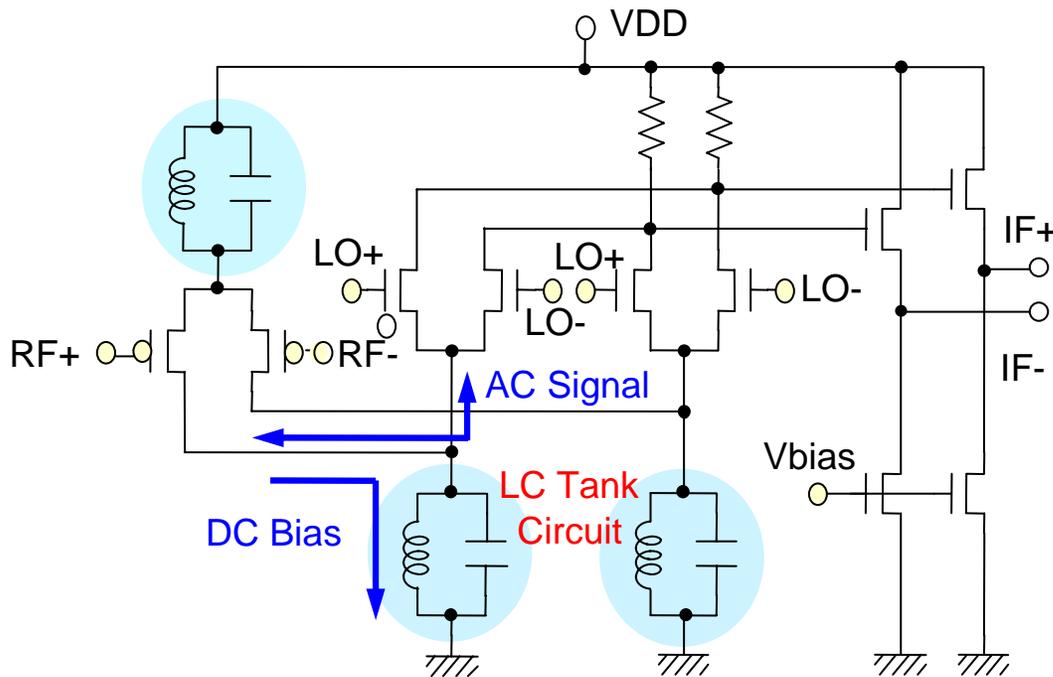
J. Kajiwara, et al., VLSI Sympo. 2002.

低い電圧から2倍の電圧へ昇圧する、
スイッチトキャパシタ型昇圧回路。



LCタンク回路を用いた低電圧ミキサー

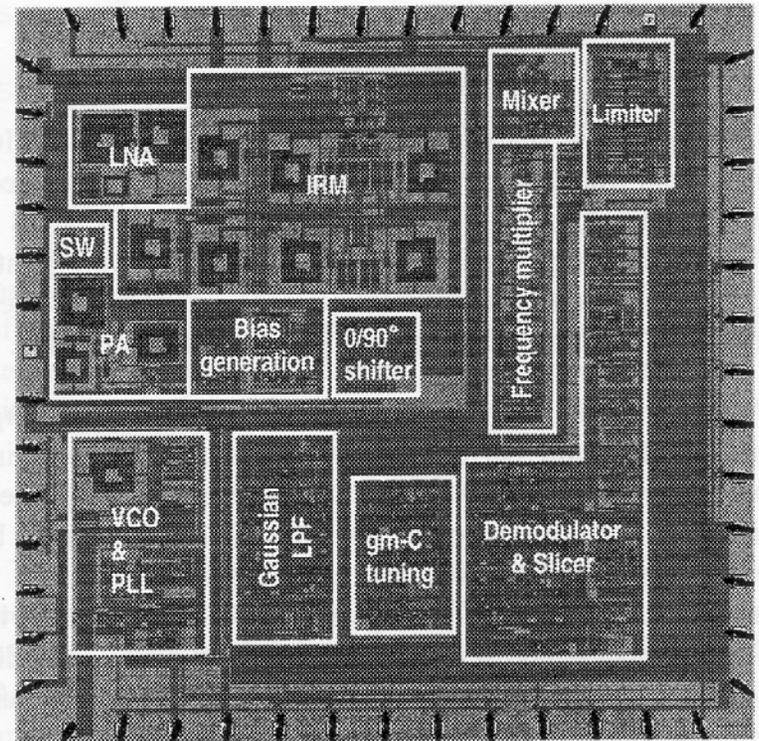
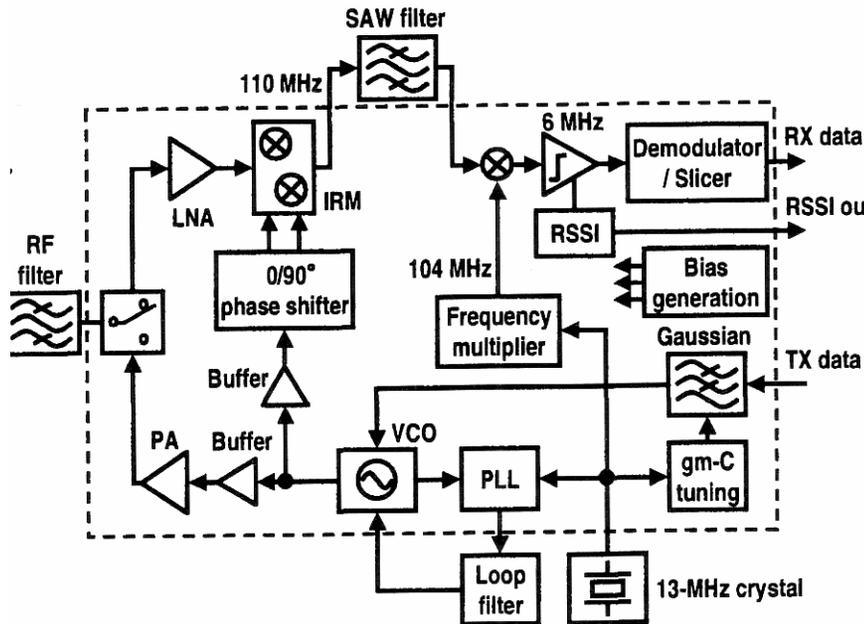
FD-SOIとLCタンクによる受動的な低電流源を用いることで、
0.5V~1.0Vで動作するミキサーを実現した



M.Harada et al., ISSCC2000

FD-SOIを用いた、1Vで動作するBluetooth トランシーバ

0.2um FD-SOIにより1V動作、53mW(TX), 33mW(TX)のBluetooth トランシーバが実現



M. Ugajin, et al., VLSI Ckt Symp. 2003, pp.123

まとめ

ユビキタスチップの集積化技術

■ 電力伝送

- 電磁界結合
 - ◆ 周波数が高くアンテナが小さい。遠方まで届く。
- 磁気結合
 - ◆ 周波数が低くアンテナが大きい。近接用。

■ 信号伝送

- 通常受信アンテナのインピーダンスを変化させて反射波を変調する。自分ではRF発生をしない。
- 受信側コイルの負荷インピーダンスを変化させて送信側コイルに起電力を発生させる。

■ 自然エネルギーの利用

■ 完全空乏型SOI

- 低電圧・低電流動作が可能
- 高比抵抗基板との併用でRFロスが少なく低電力化が可能