九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

無電池式RFIDでの弱結合時の充電電圧向上についての検討

金川, 典史
九州大学大学院システム情報科学府電子デバイス工学専攻 : 修士課程

黒木, 幸令
九州大学大学院システム情報科学研究院電子デバイス工学部門

https://doi.org/10.15017/1516211

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 10 (1), pp.67-72, 2005-03-25. 九州大学大学院システム情報科学研究院
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

九州大学大学院
システム情報科学紀要
第10巻　第1号　平成17年3月

Research Reports on Information Science and
Electrical Engineering of Kyushu University
Vol.10, No.1, March 2005

無電池式RFIDでの弱結合時の充電電圧向上についての検討

金川典史* ・ 黒木幸令**

Improvement of Charging Characteristics for Weak Coupled Passive RFID

Norifumi KANAGAWA and Yukinori KUROKI

(Received December 10, 2004)

Abstract: Nowadays, RFID(Radio Frequency IDentification) is used in many fields. Especially the passive RFID will be dramatically used from the advantage that a battery is not needed from now on. However, the communication capability of passive RFID is greatly influenced by communication distance and inclination of antenna. This paper proposes the rectifier for obtaining efficiently the charge voltage used as the power supply of weak coupled passive RFID. Using MOSFET($V_T \approx 0$) and voltage doubler, instead of conventional pn junction diode , makes charging voltage in K=0.001 or less possible.

Keywords: Passive RFID, Charge voltage, Weak coupling, Coupling factor, Rectifier, Voltage doubler

1. はじめに

近年，RFID（Radio Frequency IDentification：無線通信を利用した非接触による自動認識）は販売，製造，及び物流等の分野で多く用いられてきている．[1)-4)]これはRFIDが今までのバーコード等に代表される自動認識技術と比較して通信距離が長い，情報の書き換えが可能である，磨耗や汚れに強いなどの様々な利点があるからである．しかし，RFIDにも電池内臓型RFIDの場合，電池の寿命がRFIDタグの寿命になるという弱点がある．そこで現在はリーダライタからの電波を電力として使用する無電池式RFIDの利用が多くなってきている．無電池式RFIDの場合，寿命は半永久的であるが通信距離が長い場合，あるいはリーダライタとRFIDタグのコイル同士がうまく向き合わないなどの場合，必要な電力（充電電源電圧）が得られないためリーダライタとRFIDタグ間の通信ができなくなるという問題が生じる．そこで，本研究では13.56MHz帯の電磁誘導方式を用いた無電池式RFIDにおいてリーダライタとRFIDタグのコイル同士が弱結合時における電源としての充電電圧向上のために低閾値MOSFET及び倍電圧整流回路を用いた回路設計を行いその効果を検討する．13.56MHz帯を使用するのは回路設計において扱いやすく，また電波法の改正によって使用の制限が大きく緩和され多くのRFID製品に使われているからである．無電池式RFIDではコイル同士の電磁誘導を用いて通信するものが多い．

本研究での具体的な目標値として，別に試作をおこなっているRFIDタグ用回路より必要な電力を計算した結果を参考にリーダライタの電源電圧が20 Vp-pの時に充電用コンデンサ（300nF）に3.5Vの充電電圧と設定した．

2. 無電池式RFIDにおける充電

2.1 電磁誘導方式

無電池式RFIDの構造は**Fig.1**に示すようになっている．RFIDは物に貼り付けたり，人が身につけたりするRFIDタグとそれを読み取ったり，書き換えたりするリーダライタから構成されている．

リーダライタとRFIDタグ間はコイル（アンテナ）同士の電磁誘導を用いて通信を行う．[4),5)]この時，情報と同時にリーダライタ側からRFIDタグ側に電力も供給される．具体的には，まずリーダライタ側からの電波をRFIDタグ側のLC共振回路で電圧を増幅させる．次に，増幅された交流電圧を整流回路で直流電圧に変換し充電用コンデンサに回路駆動用電力として充電させる．こうして得られた電力を用いてデジタル回路等を動作させ信号をRFIDタグ側からリーダライタ側へ送り返す．現在製品化されている無電池式RFIDの通信距離は数cm～十数cm程度である．本研究では数十cm以上の通信距離を目指す．

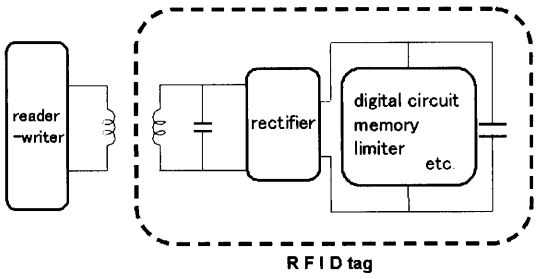

Fig. 1 Structure of the passive RFID.

平成16年12月10日受付
* 電子デバイス工学専攻修士課程
** 電子デバイス工学部門

2.2 結合係数K

結合係数Kは電磁誘導においてコイル同士の電気的結合の度合いを表し，二次側コイルの誘導電圧を得る上で重要な要素であり式(1)のように表せる．

$$K = \frac{M}{\sqrt{L1 \cdot L2}} \tag{1}$$

ここで，Mは相互インダクタンス，L1，L2はそれぞれ一次側，二次側コイルのインダクタンスである．

結合係数Kはコイル同士の距離，面積比，傾きに大きく影響される．今回，**Fig.2**のような測定モデルを用いて測定と計算により結合係数Kを算出した．測定に用いたコイルL1，L2はL1 = L2 =6.3μ H=(45mm×80mm, 7turn)である．

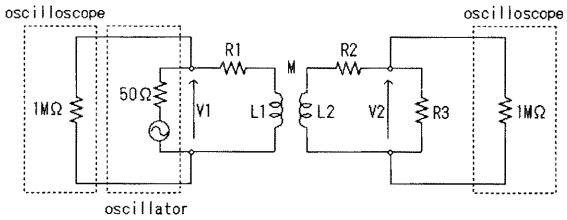

Fig. 2　The measurement model of K.

Fig.2の測定モデルより結合係数Kを導き出すと式(2)のようになる．

$$K = \left[\frac{1}{2 \cdot L1 \cdot L2 \cdot \omega^2} \cdot \left\{A - \sqrt{B - C}\right\}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

$$A = 2 \cdot L1 \cdot L2 \cdot \omega^2 + \frac{|V1|^2}{|V2|^2} \cdot R3^2 - 2 \cdot R1 \cdot R4$$

$$B = \left(2 \cdot R1 \cdot R4 - 2 \cdot L1 \cdot L2 \cdot \omega^2 - \frac{|V1|^2}{|V2|^2} \cdot R3^2\right)^2$$

$$C = (R1^2 + \omega^2 \cdot L1^2) \cdot (R4^2 + \omega^2 \cdot L2^2)$$

ただし，$R4 = R2 + R3$，$1M\Omega \gg R3$，$\omega = 2\pi f$である．

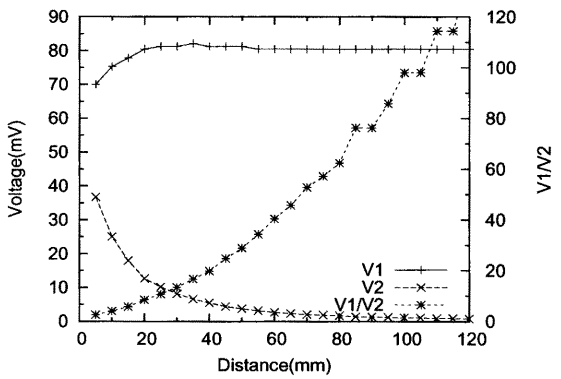

Fig. 3　Measurement result.

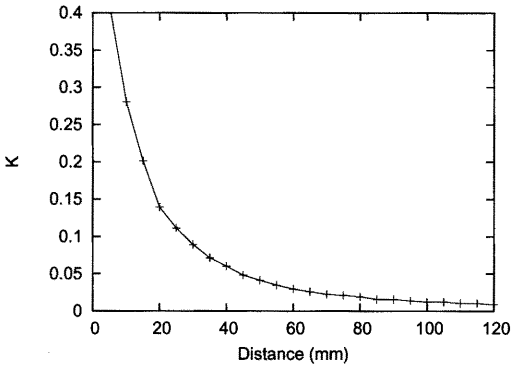

Fig. 4　Relation between distance and K.

式(2)より電圧V1，V2の振幅の比を除く他のパラメータは事前にわかっている事からV1，V2の振幅の比を測定することによって結合係数Kを求めることができる．**Fig.3**は平行に対向させたコイルの距離とV1，V2の振幅及びその比の測定結果である．この測定結果と式(2)より結合係数Kと距離の関係を表したのが**Fig.4**である．コイル同士の距離が離れるほど結合係数Kが小さくなりこのことが遠距離において無電池式RFIDが動作しない原因となっている．

2.3 従来の整流回路（半波・全波整流回路）

従来多く用いられている整流回路として，**Fig.5**，**Fig.6**に示すような半波整流回路，全波整流回路がある．

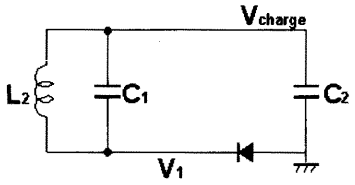

Fig. 5　Half-wave rectifier.

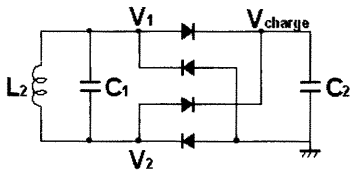

Fig. 6　Full-wave rectifier.

半波整流回路は，共振により得られた交流電圧をGND（理想時）にクランプすることにより直流成分を生成させコンデンサに充電する．しかし，この整流回路は理想時においてVp-pの約1/2すなわち約交流振幅分しか直流成

分を得ることができないという欠点がある．そのため，必要電圧の約2倍以上の交流電圧が共振により得られる結合係数Kの時にしか必要な充電電圧は得られない．**Fig.7**は実際に試作した半波整流回路の通信距離$3cm$($K = 0.1$)におけるV_{charge}の測定結果である．多少ノイズはあるが電波が約$1.9V$の直流電圧として充電されていることがわかる．

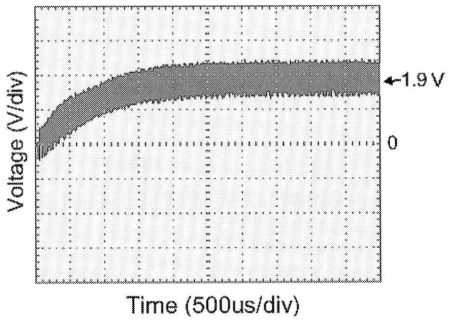

Fig. 7　Measurement result (V_{charge}).

全波整流回路は，共振によって得られた交流電圧を正の部分はそのままで負の部分は正に反転させることにより直流成分を生成しコンデンサに充電する．半波整流回路と比較して出力リップルが約1/2倍となる．

3. 従来の整流回路における問題点

2.3で示した半波整流回路，全波整流回路についてHSPICEを用いて弱結合時（K=0.001，0.005）における充電電圧V_{charge}のシミュレーションを行った．その他の各パラメータは下記の通りである．共振用コンデンサC_1はコイルL2と13.56MHzで共振を行うように設定した．また，充電用コンデンサC_2はシミュレーション時間短縮のため実際に使用するものより小さなものを使用した．

リーダライタ電源　：$13.56[MHz]$,$20[V_{p-p}]$
コイル（アンテナ）：2.2のコイル$L1, L2$と同じ
共振用コンデンサC_1　：$21.9[pF]$
充電用コンデンサC_2　：$1[nF]$

ここで，ダイオードとしては**Fig.8**に示すようなpn接合ダイオードを用いた．

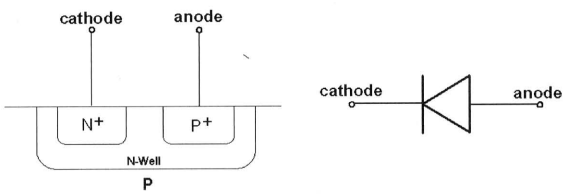

Fig. 8　pn junction diode.

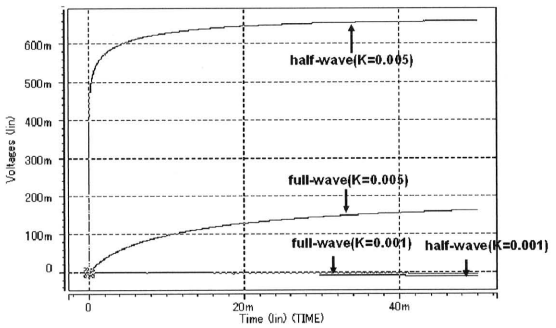

Fig. 9　Simulation of two rectifier (V_{charge}).

Fig.9は K=0.001及び0.005における半波整流回路と全波整流回路のそれぞれの充電電圧V_{charge}のシミュレーション結果である．K=0.001において2つの整流回路はともに充電電圧が生成されていない．これは，Kが小さいことにより共振によって生成される交流電圧が使用したpn接合ダイオードの閾値電圧よりも小さいため整流が行われなかったことが原因と考えられる．また，K=0.005ではチップの駆動に必要な充電電圧（3.5V）が十分得られていない．これは，共振によって得られる交流電圧が小さいと半波整流回路と全波整流回路ではより大きな充電電圧を生成できないことが原因と考えられる．

従って，弱結合時における充電電圧を向上させるためにはこの2つの問題を解決する必要がある．

4. 弱結合時の動作効率の改善

Fig.9から半波整流回路，全波整流回路ではリーダライタとRFIDタグのコイル同士が弱結合時（結合係数K：小）には充電電圧が十分に得られないことが分かった．従って，弱結合時の充電電圧を向上させる方法として低閾値MOSFETのダイオードへの適用と倍電圧整流回路の使用を提案する．

4.1 低閾値MOSFETのダイオードへの適用

3章ではpn接合ダイオードを用いて整流を行ったが，ダイオードの閾値よりも交流電圧が小さな場合整流されないという問題が生じる．そこで，微小な交流電圧でも整流できるように閾値の小さなMOSFETをダイオードとして適用することで問題を解決する．このダイオードの構造は**Fig.10**のようになっており，ダイオードとしての閾値はMOSFETの閾値によって決まる．

Fig.11はそれぞれの閾値の違いを示したものでありpn接合ダイオードと比較して低閾値MOSFETで代用したダイオードは閾値が小さくなっていることが分かる．**Fig.12**は半波整流回路におけるそれぞれのダイオードを用いた充電電圧の比較である．この結果より，弱結合時においてダイオードとして低閾値MOSFETを使用するこ

とが効果的だということが分かる．

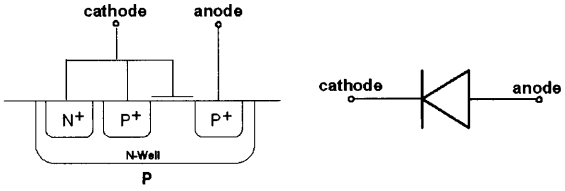

Fig. 10 Low threshold voltage MOSFET with diode connection.

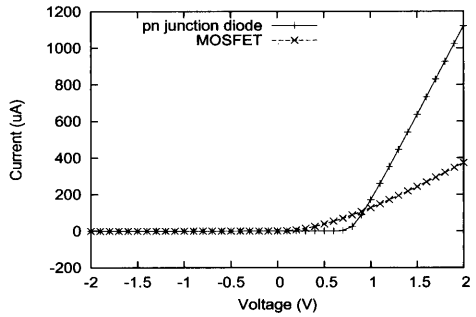

Fig. 11 I-V characteristic of two diodes.

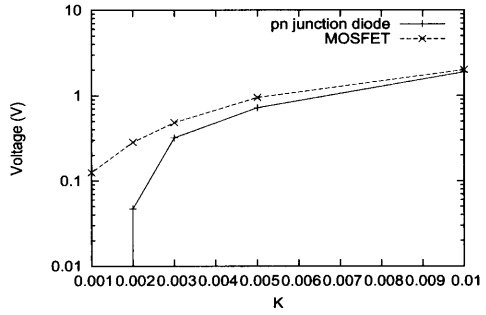

Fig. 12 Charge characteristic of two diodes.

4.2 倍電圧整流回路による充電電圧の向上

従来の整流回路では**Fig.9**で示されているようにK=0.005のような弱結合時においては例え交流電圧を整流できたとしてももともとの交流電圧が小さいため必要な充電電圧を得ることができない．そこで，交流電圧が小さい場合でも十分な充電電圧を得られる回路として倍電圧整流回路を用いる．

Fig.13は最もシンプルな倍電圧整流回路である．この回路は電圧の重ね合わせの理を使って動作する．一度交流電圧をダイオードで整流した後，もう一度元の交流電圧を重ね合わせるとある一定方向の電圧だけが大きくなっていく．これを用いることにより元の交流電圧よりも大きな充電電圧を得ることができる．また，倍電圧回路を多段に組み合わせることにより何倍もの充電電圧を得ることが可能である．

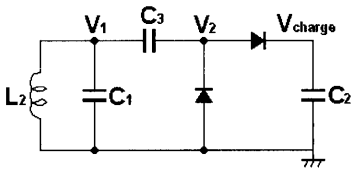

Fig. 13 Voltage doubler.

Fig.14は$C_2 = 100[nF]$，$C_3 = 10[nF]$，K=0.01としダイオードに4.1で説明した低閾値MOSFETを使用した**Fig.13**のV_2，V_{charge}におけるシミュレーション波形である．他の条件は3章と同様である．この回路では$20msec$で約2.7Vの充電電圧V_{charge}を得ることができた．

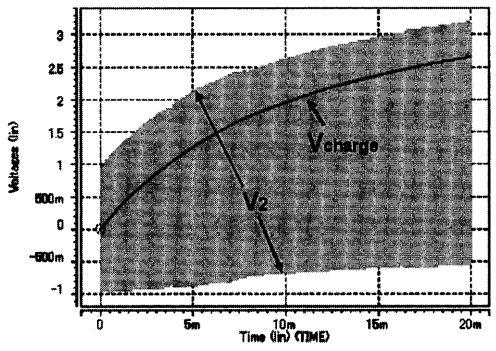

Fig. 14 Simulation of voltage doubler.

また，**Fig.15**のように低閾値MOSFETダイオードを多段に重ねて用いた場合，N-Wellの電位がP基板よりも高くなることからダイオードはDC的に互いに離されるのでそれぞれのダイオードは独立して機能する．従って，一つの基板上に集積化が可能であり，**Fig.16**のような16倍電圧整流回路をチップに搭載することもできる．

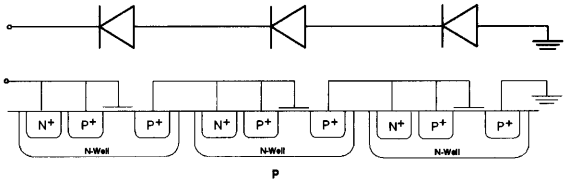

Fig. 15 Cascade connected low threshold voltage MOSFET with diode connection.

16倍電圧整流回路の場合，正負それぞれの半周期において交流電圧を整流しそれぞれ8倍電圧整流された充電電圧を生成することによって，その差より16倍電圧整流した充電電圧を生成している．

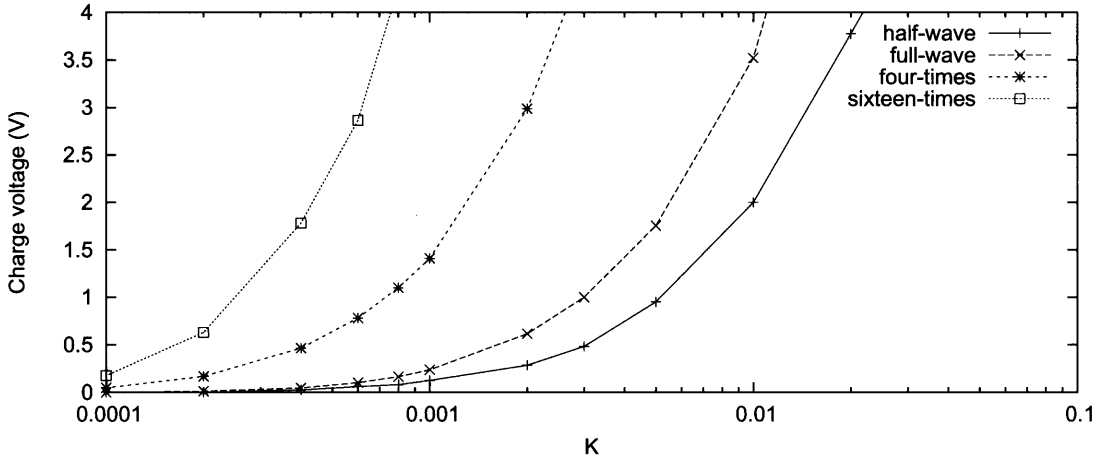

Fig. 17 Performance comparison of each rectifier.

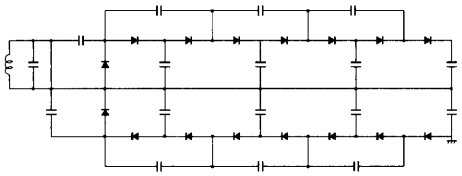

Fig. 16 Sixteen-times-voltage doubler.

4.3 各整流回路の充電電圧の比較

ダイオードには低閾値MOSFETを使用し，半波整流回路，全波整流回路及び倍電圧整流回路として4倍電圧整流回路，16倍電圧整流回路を用いて各整流回路の弱結合時（K=0.1～0.0001）におけるシミュレーションを行いそれぞれの充電電圧を比較した．コンデンサC_1,C_2以外のコンデンサはすべて10[pF]とし，充電用コンデンサC_2はシミュレーション時間短縮のため250[pF]を用いその他のパラメータは3章と同様にした．シミュレーション結果は**Fig.17**に示す．

5. 考　　察

Table 1は4.3でのシミュレーションより各整流回路における充電電圧と結合係数Kの関係を表している．**Fig.17**及び**Table 1**より倍電圧整流回路は大きな充電電圧を得るという点で半波整流回路，全波整流回路と比較して優れていることが分かる．特に，コイル同士の弱結合領域（結合係数K：小）において非常に良好な特性を示している．これは，リーダライタとRFIDタグの通信距離を考える上で重要になってくる．**Fig.4**で求めた結合係数Kと通信距離の関係より通信距離が大きくなるほど結合係数Kの変化率は小さくなっている．例えば，通信距離が5mmから10mmでは結合係数Kが0.13(31%)変化したのに対し，115mmから120mmでは0.002(16%)の変化しかしていない．このことより，弱結合領域における整流回路の特性を向上させると通信距離を格段に伸ばすことができるということが分かる．リーダライタ側のコイルをRFIDタグ側のコイルと比較して大きくしていくと近距離での結合係数Kは小さくなるものの距離に対する結合係数Kの変化率が小さくなることから，遠距離での結合係数Kは逆に大きくなる．これを利用して，倍電圧整流回路と組み合わせることによってより通信性能のいい無電池式RFIDを実現できると思われる．

Table 1 Relation between charge voltage and K in each rectifier.

charge	K			
voltage	half-wave	full-wave	4-times	16-times
3.5	0.0184	0.01	0.0024	0.0007
3	0.0157	0.0086	0.0021	0.0006
2	0.0103	0.0058	0.0014	0.00044
1	0.00052	0.003	0.0008	0.00027
0.5	0.0027	0.0016	0.0004	0.00015

また，弱結合領域における整流回路の性能向上は通信距離の向上のほかにリーダライタとRFIDタグの指向性の向上ということにもつながる．2.2でも述べたが，結合係数Kはコイルの向きにも大きく影響する．たとえ，通信距離が短くてもコイル同士がうまく向き合っていないと結合係数Kが小さくなり通信できない場合がある．弱結合領域での整流回路の性能向上はRFIDの指向性の向上にもつながる．

しかし，倍電圧整流回路は面積が他の整流回路と比較して大きくなってしまうという問題点がある．これは，多段にすることで多くのMOSFETとコンデンサを使用するためである．単純に，配線の面積を考えず共振部分と

充電用コンデンサは除外して考えると，面積は半波整流回路はMOSFET１つ，全波整流回路はMOSFET４つとなりｎ倍電圧整流回路では式(3)のようになり，今回シミュレーションで使用したパラメータを用いて各々の面積を比較すると**Table 2**のようになる．

$$S = n \cdot (S_{MOS} + S_{con}) \tag{3}$$

S：倍電圧整流回路の面積
S_{MOS}：$MOSFET$の面積
S_{con}：コンデンサの面積

Table 2 Comparison of each rectifier area.

	area(μm^2)	
half-wave	0.75	
full-wave	3	
four-times	20003	(140×140 μm)
sixteen-times	80012	(280×280 μm)

Table 2を見て分かるように，倍電圧整流回路は他の整流回路より多くの面積を必要とする．従って，チップを設計する場合はチップ面積と通信距離のトレードオフを考慮しなければならない．しかし，今回用いた16倍電圧整流回路でもワイヤボンディング用パッドの4個分程度なので十数倍電圧整流回路程度では特に問題となることはない．

6. おわりに

本研究では，RFIDにおける通信性能の向上という点から弱結合時における整流回路の性能を検討した．低閾値MOSFET及び倍電圧整流回路を用いることにより，弱結合時の充電電圧向上という観点では十分今後に生かせる結果を得られたと思う．本研究では，16倍電圧整流回路においてK=0.0007程度まで目標としていた充電電圧3.5Vを得ることができた．これは通信距離に直すと数十cmの距離になり，従来のものと比較して通信性能は向上した．共振回路のQの向上，コイルの形状の改良などと組み合わせることにより様々な応用が見込まれる．

本研究は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し，シノプシス株式会社の協力で行われたものである．

参考文献

1) Ulrich Kaiser and Wolfgang Steinhagen, *A Low-Power Transponder IC for High-Performance Identification Systems*, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.30, No.3, March, 1995.
2) Won-Seok Oh, Jong-Tae Park, and Chong-Gun Yu, *A CMOS Transuponder IC Using a New Damping Circuit*, IEICE Trans.Electron, Vol.E85-C, No.6, June, 2002.
3) Udo Karthaus and Martin Fisher, *Fully Integrated Passive UHF RFID Transponder IC With 16.7-μ W Minimum RF Input Power*, Journal of Solid-State Circuits, Vol.38, No.10, October, 2003.
4) Klaus Finkenzeller著，ソフト工学研究所訳，RFIDハンドブック，日刊工業新聞社，pp.23-134，2001.
5) Steve C.Q.Chen and Valerie Thomas, *OPTIMIZATION OF INDUCTIVE RFID TECHNOLOGY*, http://shay.ecn.purdue.edu/~rfid/SP03/Docs/inductive.pdf.