

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360148

研究課題名（和文） メタマテリアル導入によるシリコン基板上アンテナの高性能化

研究課題名（英文） High Performance Silicon On-chip Antenna Using Metamaterials

研究代表者

佐野 栄一（SANO EIICHI）

北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：10333650

研究成果の概要（和文）：シリコン基板が低抵抗であるため、高利得アンテナをシリコン基板上に形成することは困難であった。そこで、CMOS LSI の配線層を用いた人工誘電体(ADL)を最上層アンテナとシリコン基板の間に形成し、アンテナ利得の向上を試みた。CMOS 製造技術と同様の製造技術により、ADL とダイポールアンテナを設計試作した。その結果、利得は 3 dB 向上し、10 GHz 帯において低抵抗シリコン基板上に作製されたアンテナでは最高性能を実現した。

研究成果の概要（英文）：On-chip antennas are demanded to further lower the cost of wireless CMOS ICs. The low resistivity of silicon substrates is a major obstacle to fabricate high-gain on-chip antennas. We placed an artificial dielectric layer (ADL) between an antenna and Si substrate to improve the antenna gain. A half-wave dipole-antenna that has ADL was designed and fabricated using a CMOS-compatible process with one poly-Si and two metal layers. Using the ADL enhanced gain by 3-dB. The measured gain was the highest ever achieved for the antennas operating at around 10 GHz on low-resistivity Si substrates. A method for further improvement is discussed. In addition to the improved antenna, we investigated wireless communication circuits monolithically integrated with antenna and nano-carbon materials for electromagnetic shielding applications.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2009年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2010年度	3,100,000	930,000	4,030,000
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：半導体集積回路

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：メタマテリアル、負屈折率、磁気壁、アンテナ、RFCMOS、無線通信回路

1. 研究開始当初の背景

(1) 無線通信用集積回路としてのシリコン CMOS の利点は高集積性ゆえに RF 回路と物理層/MAC 層処理部のワンチップ化が可能ということにあるが、アンテナは外付け部品として存在し、小型化、低価格化を阻害してきた。その最大の原因は、シリコン基板が導電性であるため、高利得なアンテナをシリコ

ン基板上に作製することの困難性にある。通常の CMOS LSI 製造に用いられる低抵抗基板上に作製されたアンテナの利得は要求値よりも約 20 dB 低い。

(2) 「自然界に存在する物質では生じ得ない電磁特性を、人工的な構造で実現する」メタマテリアルが近年注目されている。1968 年に Veselago が、誘電率と透磁率が同時に負

であるとき屈折率が負になることを示し、今世紀になって初めて、Smithらにより負屈折率が実証された。また、回路素子（インダクタとキャパシタ）による左手系伝送線路がItoらにより提案されている。

(3) メタマテリアルの一種として、図1に示すような電気（メタル）壁と双対関係にある人工磁気壁が提案されている。人工磁気壁をアンテナとシリコン基板の間に挿入してアンテナ反射板とすることにより、高利得化が原理的には可能である。しかしながら、集積回路上の層間絶縁膜は $1\mu\text{m}$ 以下と薄く、テラヘルツ帯で動作させることは可能であるが、マイクロ波帯には適用できない。

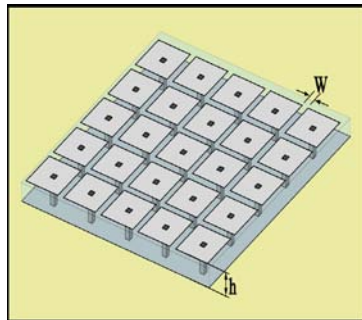


図1. 人工磁気壁

(4) 人工磁気壁の等価回路が右手/左手系伝送線路の等価回路と同等であることに着目し、マイクロ波帯で動作するメタマテリアルを導入することにより、アンテナの高利得化が可能であるとの着想に至った。

2. 研究の目的

- (1) CMOS LSI 配線技術を用いてメタマテリアルを実現し、最上層配線を用いたアンテナの下にメタマテリアルを配置することにより、シリコン基板の影響を排除して、アンテナの高利得化を達成する。
- (2) 高利得アンテナと無線 RF 回路を集積化して、小型化と低電力化を図る。

3. 研究の方法

- (1) 図1に示した人工磁気壁の等価回路が右手/左手系メタマテリアルと等価であるため、CMOS LSI 配線技術を用いた右手/左手系メタマテリアルの設計、試作、評価を行う。
- (2) 右手/左手系メタマテリアルとアンテナを厳密に電磁界解析することは計算機メモリの制限で困難なため、メタマテリアルを等価表現する手法を考案する。
- (3) メタマテリアルを導入したアンテナを設計、試作、評価し、高利得化の効果を検証する。
- (4) 高利得アンテナと無線 RF 回路を集積化した回路を設計、試作、評価し、優位性を確

認する。

(5) 設計と試作には、 $0.18\mu\text{m}$ CMOS 製造技術を用いる。

4. 研究成果

(1) 右手/左手系伝送線路を二次元配置したメタマテリアルを設計、試作、評価した。その結果、CMOS LSI 配線層の配線層が薄いことに起因して、配線抵抗の影響を無視できず、理想的なメタマテリアルの実現はかなり困難であること、そのため、二次元メタマテリアルをアンテナとシリコン基板間に配置してもアンテナの利得向上は望めないことがわかった。

(2) そこで、人工的に高誘電率を実現できる人工誘電体に着目した。人工誘電体の構造を図2に示す。

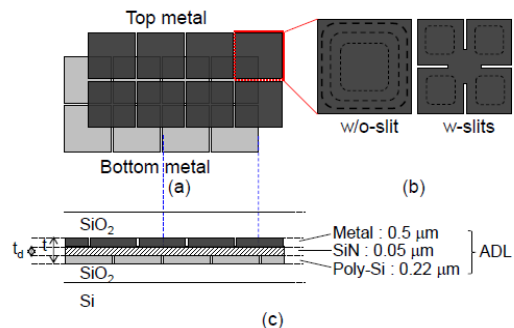


図2. 人工誘電体の構造

- (a) 平面図 (b) メタルパッチの詳細
(c) 断面図

この構造においてメタル面に沿った方向の誘電率は次式で与えられる。

$$\epsilon_{||} = \epsilon_d A / (t t_d) \quad (1)$$

ここで、 t_d と ϵ_d は絶縁層の厚さと誘電率、 A は二層のメタルが重なり合う部分の面積、 t は全体の厚さである。このため、厚さを薄くすることにより、10,000 を超える誘電率を実現できる。

高誘電体層の効果を時間領域差分(FDTD)法電磁界解析プログラムにより解析した。その結果を図3に示す。SiO₂/シリコン上に形成した通常のコプレーナ線路においては、電界がシリコン基板内にも侵入して、これにより伝搬損失が増大する。一方、シリコン基板とコプレーナ線路間に高誘電体層を配置した場合には、電界がシリコン基板内には侵入していない。コプレーナ線路のかわりにアンテナを配置した場合でも、この効果は期待できる。なお、この解析では高誘電体層は均一の物質であると仮定し、式(1)に示した面方向の誘電率を10,000としている。

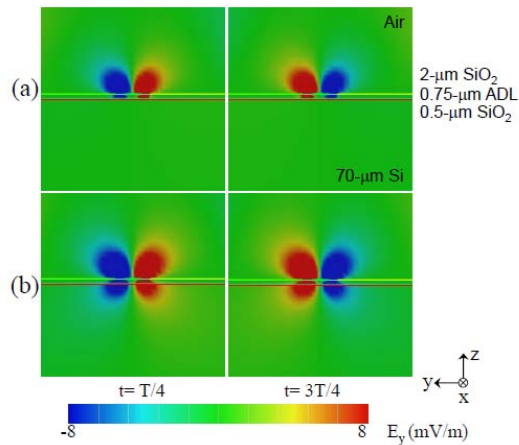


図3. (a) 高誘電体層上のコプレーナ線路、(b) 通常のコプレーナ線路における電界分布

(3) 図2に示した人工誘電体のメタルパッチサイズは $30 \times 30 \mu\text{m}$ であり、これをアンテナの下に敷く場合、一辺に 100 以上のパッチを必要とする。しかも、SiN 膜の厚さは $0.05 \mu\text{m}$ であり、FDTD 電磁界解析に必要なメッシュ数を通常の計算機で扱うことは困難である。そこで、図4に示す基本セルを解析し、均一媒質で置き換えることが可能か検討した。その結果、均一媒質で置き換えても支障がないことがわかった。

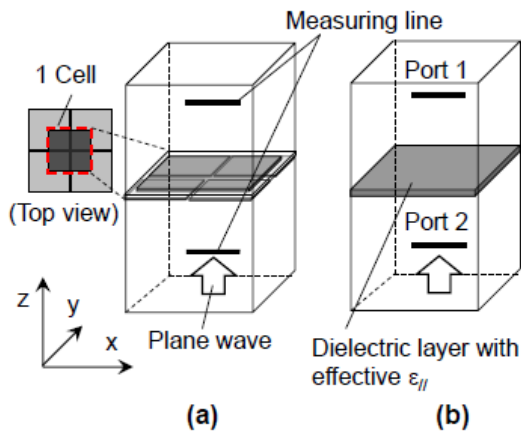


図4. 基本セルの解析モデル
(a) 厳密モデル、(b) 均一媒質モデル

(4) 図2(c)に示した断面図の最上層 SiO_2 上にアンテナを配置する構成で、ダイポールアンテナを設計した。アンテナサイズの制限のため、10 GHz 近傍でインピーダンス整合が取れるように設計した。人工誘電体の面方向誘電率は 26,000 である。試作したアンテナの顕微鏡写真を図5に示す。横方向の長さは約 6 mm である。なお、比較のために、人工誘電体を配置しないアンテナ、高抵抗シリコン基板上的のアンテナについても、最適設計を

行った。

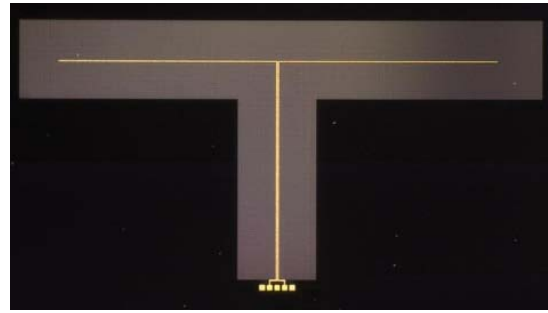


図5. 人工誘電体上のダイポールアンテナ

ベクトルネットワークアナライザを用いて測定したアンテナの反射特性を図6に示す。良好な反射特性が得られている。

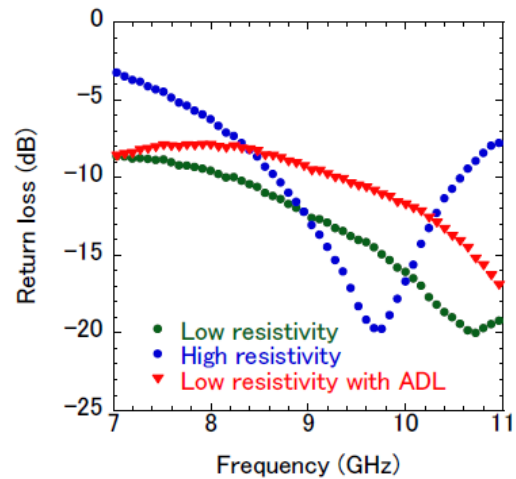


図6. アンテナの反射特性

市販の標準ホーンアンテナとベクトルネットワークアナライザを用いて、試作したアンテナの利得を測定した。利得の周波数依存性を図7に、指向性特性を図8に示す。通常の低抵抗基板上的のアンテナと比較して、人工誘電体を挿入することにより 3 dB 利得が向上することがわかった。また、実験と計算とは比較的良く一致している。3 dB の利得向上に止まった原因は、ポリシリコン層の抵抗にある。図7に示したように、ポリシリコン層を抵抗の低い金属層に置き換えることができれば、高抵抗シリコン基板上的のアンテナと同等の利得が得られる。

本研究で得られた成果の位置づけを報告されているアンテナ利得と比較して図9に示す。10 GHz 近傍で報告されているアンテナの中では最高性能を示している。

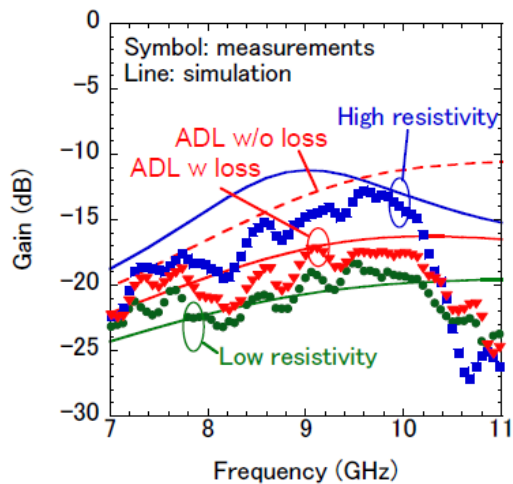


図 7. 利得の周波数依存性

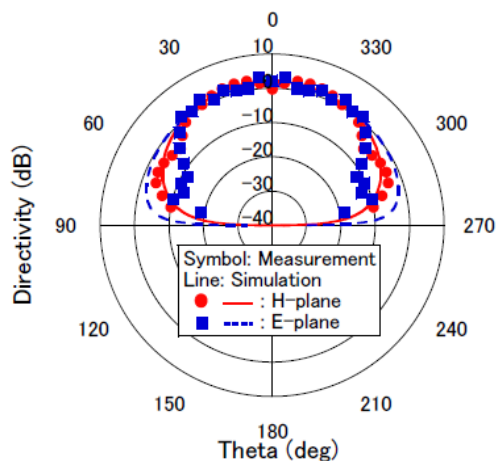


図 8. 指向性特性

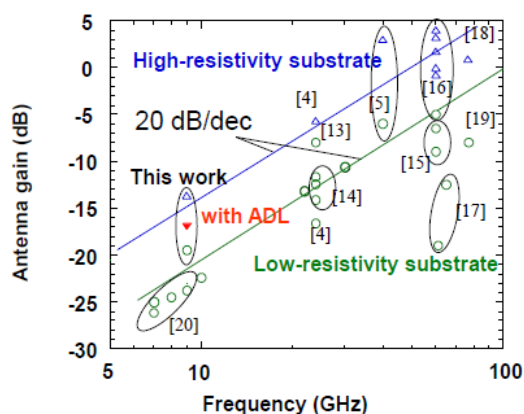


図 9. 報告されているアンテナ利得との比較
[]内の数字は文献番号。詳細は発表論文①を参照されたい。

(5) 高利得アンテナと無線通信用 RF フロントエンドの集積化を試みた。広帯域無線 (3.1~10.6 GHz)を想定し、アンテナと低雑音増幅器(LNA)を一体化した。試作した回路の顕微鏡写真を図 10 に示す。測定した利得特性を図 11 に示す。広帯域化のために逆 F アンテナを用い、中間部分で折り曲げた構成をとっている。用いた人工誘電体の絶縁層が厚いため、前項のアンテナと比較して利得は低下している。しかしながら、ハイブリッド構成においては通常 50Ω の特性インピーダンスのもとにアンテナと LNA を設計するが、集積回路の場合には、特性インピーダンス設計に自由度があり、最適設計が容易になる。

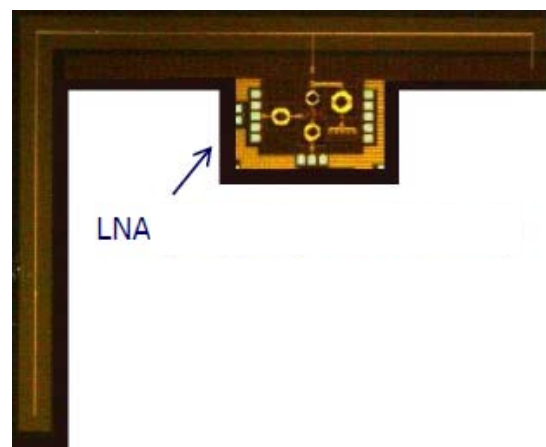


図 10. アンテナと LNA を集積化した回路

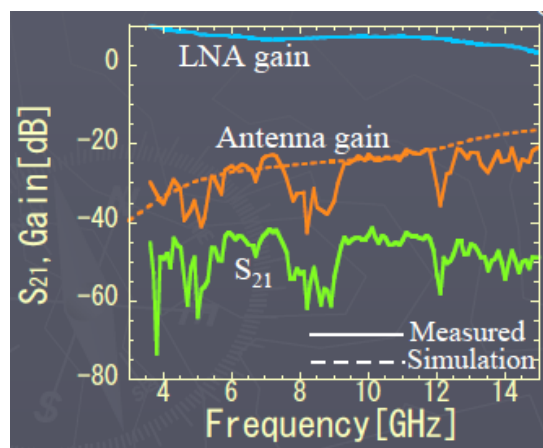


図 11. 利得特性

(6) 高誘電率を実現できる材料としてナノカーボン材料を誘電体に分散した新規複合材料の物性についても研究展開した。100 を超える誘電率が得られるが、導電率も増加するため、アンテナ利得向上よりもむしろ電磁波シールド材として適していることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① K. Takahagi and E. Sano, “High-gain silicon on-chip antenna with artificial dielectric layer,” *IEEE Trans. Antenna & Propagation*. 「掲載決定」査読有
- ② B. Fugetsu, E. Sano, H. Yu, K. Mori, and T. Tanaka, “Graphene oxide as dyestuffs for the creation of electrically conductive fabrics,” *Carbon*, vol. 48, no. 12, pp. 3340-3345, 2010. 査読有
- ③ K. Takahagi and E. Sano, “High-gain silicon on-chip antenna with artificial dielectric layer,” *Proc. 2010 Asia-Pacific Radio Science Conf.*, paper DC1-5, 2010. 査読有
- ④ M. Ikebe, D. Ueo, K. Takahagi, M. Ohuno, Y. Takada, and E. Sano, “A 3.1-10.6 GHz RF CMOS circuits monolithically integrated with dipole antenna,” *Proc. 2009 IEEE Int'l Conf. Electronics Circuits and Systems*, pp. 17-20, 2009. 査読有
- ⑤ K. Takahagi, M. Ohno, M. Ikebe, and E. Sano, “Ultra-wideband silicon on-chip antennas with artificial dielectric layer”, *Proc. 2009 Int'l Sympo. Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, pp. 81-84, 2009. 査読有
- ⑥ B. Fugetsu, E. Sano, M. Sunada, Y. Sambongi, T. Shibuya, X. Wang, and T. Hiraki, “Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding efficiency of carbon nanotube/cellulose composite paper,” *Carbon*, vol. 46, pp. 1256-1258, 2008. 査読有

[学会発表] (計 15 件)

- ① 高萩和宏, 佐野栄一, “人工誘電体を用いた高利得シリコン基板上アンテナ,” 2011 電子情報通信学会総合大会, 東京都市大学(東京), 2011年3月15日.
- ② 近藤亮, 池辺将之, 本久順一, 佐野栄一, “マルチバンド無線通信用インダクタレス低雑音増幅器の設計,” 2011 電子情報通信学会総合大会, 東京都市大学(東京), 2011年3月14日.
- ③ K. Takahagi and E. Sano, “High-gain silicon on-chip antenna with artificial dielectric layer,” 2010 Asia-Pacific Radio Science Conf. (Toyama, Japan), Sept. 25, 2010.
- ④ 近藤亮, 池辺将之, 本久順一, 佐野栄一,

“ドレイン接地フィードバックを用いた UWB 用低雑音増幅器,” 2010 電子情報通信学会総合大会, 東北大学(仙台), 2010年3月17日.

- ⑤ 高萩和宏, 佐野栄一, “人工誘電体を用いた Si オンチップアンテナの高利得化,” 2010 電子情報通信学会総合大会, 東北大学(仙台), 2010年3月16日.
- ⑥ M. Ikebe, D. Ueo, K. Takahagi, M. Ohuno, Y. Takada, and E. Sano, “A 3.1-10.6 GHz RF CMOS circuits monolithically integrated with dipole antenna,” *2009 IEEE Int'l Conf. Electronics Circuits and Systems (Hammamet, Tunisia)*, Dec. 14, 2009.
- ⑦ K. Takahagi, M. Ohno, M. Ikebe, and E. Sano, “Ultra-wideband silicon on-chip antennas with artificial dielectric layer”, *2009 Int'l Sympo. Intelligent Signal Processing and Communication Systems (Kanazawa, Japan)*, Dec. 7, 2009.
- ⑧ 高萩和宏, 佐野栄一, 池辺将之, “人工誘電体を用いた Si オンチップアンテナの設計,” 2009 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 新潟大学(新潟), 2009年9月18日.
- ⑨ 田中朋, 佐野栄一, 古月文志, 西村浩之, 柏木猛, 中根和靖, “カーボンナノチューブ分散ゴムの電磁波シールド特性,” 2009 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 新潟大学(新潟), 2009年9月18日.
- ⑩ 大野正輝, 池辺将之, 本久順一, 佐野栄一, “オンチップアンテナの特性に即した低雑音増幅器の広帯域化の検討,” 2009 電子情報通信学会総合大会, 愛媛大学(松山), 2009年3月19日.
- ⑪ 高田裕介, 池辺将之, 本久順一, 佐野栄一, “広帯域直交ミキサにおける共振インダクタ Q 値の影響,” 2009 電子情報通信学会総合大会, 愛媛大学(松山), 2009年3月19日.
- ⑫ 高萩和宏, 佐野栄一, “人工誘電体シールドの特性評価,” 2009 電子情報通信学会総合大会, 愛媛大学(松山), 2009年3月18日.
- ⑬ 田中朋, 佐野栄一, 秋山宏介, 今井将徳, “カーボンナノチューブ分散紙の電磁波シールド特性,” 2009 電子情報通信学会総合大会, 愛媛大学(松山), 2009年3月17日.
- ⑭ E. Sano, K. Akiyama, and M. Imai, “CNT nano-internet: Carbon nanotube/cellulose composite paper for electromagnetic interference shielding,” *1st Intl. Conf. Multifunctional, Hybrid and*

Nanomaterials (Tours, France), March 16, 2009.

- ⑮ 佐野栄一, “(招待講演)北大におけるミリ波 IC の研究状況,” 第 21 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ, 2008 年 4 月 21 日, 軽井沢プリンスホテル(軽井沢).

[その他]

ホームページ等

<http://www.rciqe.hokudai.ac.jp/thz/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 栄一 (SANO EIICHI)

北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：10333650

(2) 研究分担者

池辺 将之 (IKEBE MASAYUKI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：20374613