

学位論文審査報告

Awinash, Anand

Md., Anwarul Kabir Bhuiya

岡崎, 功太

笠原, 健司

他

<https://hdl.handle.net/2324/1564275>

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 18 (2), pp.105-134, 2013-07-26. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン：

権利関係：



学 位 論 文 審 査 報 告

氏 名 Awinash Anand
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 488 号 (学術)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名 Wideband Multi-Bit Continuous-Time
Delta-Sigma Modulator
広帯域マルチビット連続時間デルタ-
シグマ変調器

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教 授 吉 田 啓 二
(副 査) " " 加 藤 和 利
" " 准教授 金 谷 晴 一

論 文 内 容 の 要 旨

Analog-to-digital converters (ADCs) are the key building blocks of majority of electronic systems. Real world signals such as audio and video signals are inherently analog and the rapid and cost effective development in digital CMOS design motivates robust, programmable and reliable digital-signal-processing (DSP). Hence high performance ADC is mandatory to be compatible with the general trend in communication system design to convert the input analog signals in to digital 1's and 0's that can be processed using robust, programmable digital systems. Recent development in wideband data transfer forces ADC design to produce high resolution over a wideband signal, for example more than 10 bit resolution over 20 MHz bandwidth for WLAN application. Moreover, portability of modern devices expects design to be extremely low power. Achieving high resolution at low power consumption is quite challenging and thus analog-to-digital conversion design becomes critical.

Though there are several architectures available for ADC design, delta-sigma (Δ - Σ) modulators are an important class of analog-to-digital converters which use the concept of oversampling the signal and shaping the noise out of the band of interest. Though initially these modulators were considered for medium speed, high resolution applications, recent development in CMOS technology and circuit techniques have enabled to explore the regime of wideband signal for high resolution. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) uses a signal bandwidth of 1.98 MHz and a resolution of 12-bit or more is desired whereas wireless local area network (WLAN) uses a bandwidth of 20 MHz and a resolution of 10-bit or more is

desired. These two applications fall into wideband applications with high resolution and have quite a different range of signal bandwidth. Continuous-time (CT) Δ - Σ modulators are one of the best suitable architectures as it provides high resolution at low power cost. The real advantages of such modulators are that high precision analog components are not required for achieving good performance. This design pattern is important for deep sub-micron technology which permits low supply voltage with poor matching characteristics. Low power consumption and intrinsic anti-aliasing filtering are the two major advantages of a continuous-time (CT) Δ - Σ modulators system over the corresponding discrete-time (DT) Δ - Σ modulators. In addition, due to internal sampling any error is noise shaped together with the quantization noise. Thus, CT Δ - Σ design techniques avoid the key non-ideality of a DT Δ - Σ modulator. Since a multi-bit quantizer results in better performance by allowing higher out-of-band, higher dynamic range, lower power operational amplifier and lower sensitivity to clock jitter, it is preferred over single-bit quantizers. All the above mentioned advantages motivate to design wideband multi-bit continuous-time delta-sigma modulator.

The thesis is organized as follows. Chapter 1 summarizes the achieved design performance of the two modulators and low power technique feedforward charge injection technique (FCIT) and describes the design targets and its scope. Chapter 2 briefly reviews the fundamentals of delta-sigma modulator to be used for design purpose in following chapters. Since behavioral simulation of the modulator is critical to ensure power efficient and stable modulator, chapter 3 describes the behavioral simulation based on the proposed analytical method to determine out-of-band gain. Chapter 4 explains the circuit implementation for the two modulators and discusses the results obtained. In chapter 5, we elaborate FCIT as a low power technique. Chapter 6 concludes the thesis.

In this paragraph and next one, we summarize the performances of the two modulators that we explain in chapter 3 and chapter 4. Designing wideband multi-bit continuous-time delta-sigma modulator is quite challenging with reference to coefficient determination, stability at low power and hence appropriate choice of out-of-band gain is critical. In this research, first we aim to investigate an analytical method to determine out-of-band gain for multi-bit quantizer which could be different from 1.5, a rule of thumb for single bit quantizer. Since peak SNR and maximum stable amplitude have trade-off and we wish to maximize both, our analytical approach to determine out-of-band gain ensures

that both the peak SNR and the maximum stable amplitude is maximized at the same time. We proposed a simple and systematic MATLAB simulation which employs Risbo method and analytical simulation to determine the optimal out-of-band gain to achieve a maximal SNR and the maximum stable amplitude in a multi-bit delta-sigma modulator. To illustrate the proposed method, a 128 MS/s, 2 MHz signal bandwidth 4th order 2-bit continuous-time delta-sigma modulator is designed and implemented in 0.18 μ m CMOS technology to verify the concept. As a result, the modulator achieves a peak SNDR of 79.3 dB and a dynamic range of 83 dB for a 2 MHz signal bandwidth (OSR = 32) while consuming only 7.8 mW from 1.8 V supply. The design results in FoM of 0.26pJ/conv which is significant and motivates to use this analytical method.

In designing wideband multi-bit continuous-time delta-sigma modulator, clock jitter, excess loop delay and stability are of major concerns and to deal with all these non-idealities and to mitigate the effect, we provide a systematic methodology to design such modulators which ensures stable, low power high performance delta-sigma modulator. We illustrate our design methodology by designing a 4th order 2-bit modulator with OSR of 16 for signal bandwidth of 20 MHz. This modulator has quite wide bandwidth and is suitable for WLAN applications. The methodology explains how to design a low power modulator from its specification through behavior simulation to circuit implementation. It addresses the choice of architecture and topology, out-of-band gain, NTF synthesis and stable coefficient determination, scaling to optimize the output swing of integrators and power through MATLAB and cplusplus simulations and then in the next step circuit macro-models are simulated. Finally, the actual transistor level design is simulated. The designed modulator has a high SNDR of 65.7 dB and a high dynamic range of 70 dB for a signal band of 20 MHz. The modulator consumes 19.7 mW power from a 1.8 V supply to achieve FoM of 0.31 pJ/conv.

A low power technique, feedforward charge injection technique for a continuous-time delta-sigma modulator is analyzed in chapter 5. We find that the feedforward charge injection technique (FCIT) in a CTDSM significantly reduces the node voltage swing at the input of the operational transconductance amplifier (OTA) and thereby relaxes the design constraint on OTA by suppressing third harmonics and thus reduces power consumption significantly. We also observe that there exist three different regions of design with respect to the power consumption out of which only one region is critical with respect to power reduction and robust

design. Combined with the regions of design FCIT enables to design robust CTDSM with low power consumption. The SNR improvement is up to 35dB for FCIT topology of CTDSM. For the same desired SNR, the FCIT topology works for much lower bias current up to 60% lower. In this work, approach is validated with first order modulator and it is recommended that further research be continued with higher order modulator for real applications.

論文調査の要旨

無線 LAN やスマートフォン等に代表される移動体通信機器において、アナログ信号である無線信号をデジタル信号に変換するためのアナログ-デジタルコンバータ (Analog to Digital Converter : ADC) は主要な回路ブロックである。例えば無線 LAN アプリケーション用の ADC は、20 MHz の帯域幅で 10 ビットの分解能が必要である。また UMTS (Universal Mobile Telecommunication Systems) では 1.98 MHz の信号帯域幅を使用し、12 ビット以上の分解能が望まれている。更に、移動体通信機器においては、低消費電力で動作する必要がある。しかしながら、低消費電力化と高分解能化はトレードオフの関係にあり、FOM(Figure Of Merit)の向上が必要である。これまでにもさまざまな ADC が提案されているが、更なる FOM の向上が望まれていた。

本論文で著者は、オーバーサンプリングによるノイズシェーピングにより低雑音かつ低電圧動作が可能な連続時間 (Continuous Time:CT) 型 デルタ・シグマ変調器(ADC) に、マルチビット量子化器を導入することにより、高い雑音除去特性と高いダイナミックレンジを有する低消費電力・広帯域マルチビット CT 型デルタ・シグマ変調器を開発することに成功している。

本論文の成果の中でとりわけ以下の点で評価できる。

- (1) CT 型デルタ・シグマ変調器の量子化器のビット数を 2 ビット化することで、79.3dB の高い SNDR (Signal-to-Noise and Distortion Ratio) と 7.8mW の低消費電力化を実現した。その結果 FOM は世界最高クラスの 0.26pJ/conv と極めて良好な値を実現した。
- (2) 過剰ループ遅延の削減と安定性を向上するための新しい設計手法を提案し、これにより、20MHz の広い信号帯域において、オーバーサンプリングレートが従来比 16 倍の 4 次の 2 ビット変調器を設計した。これにより、広帯域において、65.7dB の高い SNDR、70dB の高ダイナミックレンジ、低消費電力 19.7mW を実現し、その結果、0.31pJ/conv の高い FOM を達成し、世界最高水準のデルタ・シグマ変調器を実現した。
- (3) 変調器の更なる低消費電力化のため、フィードフォワード型の電流注入回路を提案した。これにより SNDR の 35%の改善と、バイアス電流の 60%の削減を達成した。

以上要するに、本研究は、移動体通信システム実現に不可欠な、高い SNDR 比と低消費電力特性を有する広帯域マルチビット連続時間型デルタ・シグマ変調器の開発に成功したものであり、電気電子工学上価値ある業績である。よって本論文は博士（学術）の学位に値するものと認める。

氏 名 Md. Anwarul Kabir Bhuiya
 学位記番号 シ情 博甲第 489 号（学術）
 学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
 学位論文題名 Liquid Phase Immunoassay using
 Brownian Relaxation of Magnetic
 Marker
 （磁気マーカーのブラウン緩和を
 用いた液相免疫検査法の開発）

論文調査委員

（主 査） 九州大学 教 授 圓 福 敬 二
 （副 査） " " 松 山 公 秀
 " " " 末 廣 純 也

論文内容の要旨

Magnetic markers, which consist of magnetic nanoparticles and coating materials, have been widely studied for biomedical applications, such as magnetic separation, immunoassay, biomedical imaging, drug delivery hyperthermia. The first and foremost focus of this thesis is to develop a liquid-phase immunoassay system using the Brownian relaxation of magnetic markers and different types of magnetic sensors.

In Chapter 1, I give a brief introduction on the conventional immunoassay methods, which is used for biomedical diagnosis. Compared with the conventional methods, the liquid-phase immunoassay technique enables us to omit a time consuming washing process called bound/free (BF) separation. Then, I give a brief introduction on magnetic markers and their biomedical applications. Characteristics of magnetic markers necessary for biomedical application are also discussed.

In Chapter 2, magnetic properties caused by the Brownian relaxation of super-paramagnetic nanoparticles are studied, such as AC susceptibility and M - H curve. Frequency dependence of the ac susceptibility and the magnetization curve were measured. The effect of the viscosity of the carrier liquid on the ac susceptibility was also clarified. The experimental results were analyzed by the singular value decomposition (SVD) method in order to estimate the distributions of size d and magnetic moment m of the markers. From the frequency dependence of the susceptibility, I

obtained that the maker size is distributed from 40 nm to 80 nm with mean diameter of $d=60$ nm. From the magnetization curve, we estimated that the magnetic moment distributed from 5×10^{-25} to 5×10^{-24} Wbm with mean value of $m=3 \times 10^{-24}$ Wbm. Combining the above two results, we also obtained the relationship between m and d . The present analysis makes it possible to quantitatively characterize the Brownian relaxation of practical markers, where distributions of particle size and magnetic moment are large.

In Chapter 3, detection principle of a liquid-phase immunoassay technique is shown, which utilizes the Brownian relaxation of magnetic markers. In this method, biological targets were fixed on the surface of large polymer beads whose size was typically a few μm . When the magnetic markers were bound to the targets, their Brownian relaxation time was dominated by that of the polymer bead, becoming much longer than that of unbound (free) markers. The resulting difference between the magnetic properties of the bound and free markers was detected by relaxation measurements. Therefore, we can magnetically distinguish the bound from the free ones, i.e., we can omit a time consuming washing process called bound/free (BF) separation. This is one of the important advantages of Brownian relaxation technique. This unique property was found out and applied to my dissertation.

I also characterized the properties of the magnetic markers for liquid phase immunoassays using Brownian relaxation. I obtained the distribution of magnetic moment m and anisotropy energy E_B and determined their relationship. From the obtained result, I showed that we could classify the particles into three types: Type-1 particles with very small m and very short τ_N , Type-2 particles with medium values of m and τ_N , and Type-3 particles with large m and very long τ_N . The proportion of these three types of particles in the marker was quantitatively evaluated for the first time. We could estimate the proportion of particles responsible for the signal and the fraction of this proportion that was included in the marker. The characterization method developed in the present study was very useful for determining which markers were suitable for liquid phase immunoassays using Brownian relaxation.

In Chapter 4, the sensing system for the liquid phase immunoassay is shown. Details of the measurement system using MR and Flux Gate sensor are described, including the sensitivity of the system. The measurement system using the MR sensor showed a sensitivity to detect 1.4×10^7 of the markers in $60 \mu\text{l}$ of solution. The sensitivity was improved as 8.3×10^6 markers when the flux gate sensor was used. Using

the developed system, we demonstrated the detection of biological targets called biotins, which were conjugated on the surface of the polystyrene beads with a diameter of $3.3\ \mu\text{m}$. A strong relationship was obtained between the number of bound markers and the number of biotin-conjugated polymer beads, which confirmed the validity of the method. The minimum detectable number of beads was $N_p = 10,000$ and $5,000$ for the case of the MR and the flux gate sensor, respectively. Since about 700 biotins were fixed on the single polymer bead, the minimum detectable number of biotins was estimated as $N_b = 7.0 \times 10^6$ and 3.5×10^6 for the case of the MR and the flux gate sensor, respectively. The detection sensitivity can be estimated as high as 1.9×10^{-16} and 0.8×10^{-16} mol/ml in terms of the molecular-number concentration of biotin for the MR and the flux gate sensor, respectively, which are comparable to the conventional optical system using the washing process to separate the bound and free markers. Therefore, we could successfully demonstrate the high sensitivity of the liquid-phase detection without using the washing process for BF separation.

In Chapter 5, main results obtained in this research are summarized, and future research directions are discussed.

論文調査の要旨

ナノメータサイズの磁気微粒子を高分子で被覆し、その表面に検査用の抗体を固定したものは磁気マーカーと呼ばれており、種々のバイオ応用への研究がなされている。その中の一つが、疾患由来のタンパク質や病原菌などを検出する免疫検査である。これらのバイオ物質は抗原と総称されており、免疫検査では検出すべき抗原に特異的に結合する抗体を用い、抗原・抗体の結合反応を磁気マーカーからの磁気信号を用いて測定することによりバイオ物質の検出を行う。この磁気的な検査法は従来の光学的な検査法にはない多くの特長を有しており、新しい検査法として期待されている。特に、従来の検査法で必要であった、結合(Bound)マーカーと未結合(Free)マーカーを分離(BF分離)するための手間と時間のかかる洗浄工程を省くことが可能であり、迅速な検査が可能となる。

本論文では、磁気マーカーの溶液中でのブラウン磁気緩和特性を利用して、洗浄工程を省くことのできる液相での検査法を開発している。本手法の基礎となるブラウン緩和特性や磁気マーカーの基本特性を定量的に明らかにするとともに、試作した免疫検査装置により液相での高感度な免疫検査を実証しており、以下の点で評価できる。

第1に、磁気マーカーのブラウン緩和を用いて、結合マーカーと未結合マーカーを磁気的に識別する検出手法を開発している。固定用の高分子ビーズを用いて結合マーカーのブラウン緩和時間を未結合マーカーに比べて 10^3 程度

長くし、磁気緩和時間の違いによって両者を磁気的に識別する方法である。これにより、従来の手法で必要とされていたBF分離のための洗浄工程を省けることを示している。

第2に、本手法の基礎となる磁気マーカーの溶液中でのブラウン緩和特性の定量的な評価を行っている。ブラウン緩和過程における磁気マーカーの複素磁化率の周波数特性を解析することにより、ブラウン緩和に及ぼす磁気マーカーの粒子径と溶媒の粘度の影響を定量的に明らかにしている。特に、実際の磁気マーカーでは作製の過程において粒子径が分布することが避けられないため、粒子径の分布を考慮した解析を行い、粒度分布の影響の定量的な評価を可能としている。

第3に、検査手法の性能を決める磁気マーカーの磁気モーメントや緩和時間等の基本パラメータを定量的に評価できる解析手法を新たに開発している。本評価法を用いて市販の種々の磁気マーカーを詳細に評価し、これにより本手法に適した磁気マーカーを選定する際の指針を明らかにしている。

第4に、磁気抵抗素子とフラックスゲートを磁気センサとして用いた計測システムを試作し、本システムを用いたタンパク質(ビオチン)の検出実験により測定感度として 2×10^{-16} mol/ml を得ている。この感度は洗浄工程を用いた従来の光学的手法と同程度であり、本手法により洗浄工程なしでの高感度な免疫検査が可能であることを示している。

以上要するに、本研究は、磁気マーカーの溶液中でのブラウン磁気緩和特性を利用して、洗浄工程を省くことのできる液相での免疫検査法を開発するため、本手法の基礎となるブラウン緩和特性や磁気マーカーの基本特性を定量的に明らかにするとともに、高感度磁気センサを用いた免疫検査装置を試作し、洗浄工程なしでの高感度な免疫検査を実証しており、電気電子工学上価値ある業績である。よって本論文は博士(学術)の学位に値するものと認める。

氏 名	岡 崎 功 太
学 位 記 番 号	シ情 博甲第 490 号 (工学)
学位授与の日付	平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名	酸化亜鉛マイクロ・ナノ結晶体を用いた微小紫外レーザー光源の開発に関する研究

論文調査委員

(主 査)	九州大学 教 授	岡 田 龍 雄
(副 査)	〃	〃 浅 野 種 正
〃	〃	〃 加 藤 和 利

論文内容の要旨

II-VI 族化合物半導体である酸化亜鉛 (zinc oxide: ZnO)は、3.37 eV の大きなバンドギャップエネルギーと室温の熱エネルギー(26 meV)よりも大きな励起子束縛エネルギー(60 meV)を持ち、生体にも優しく、資源も豊富であることから、GaN に換わる高効率な紫外発光素子材料として期待されている。また、ZnO はマイクロ・ナノ結晶体を作り易く、例えばナノワイヤ形状などの導波機能を持つ良質な結晶を自己組織的に作製できる。この性質を利用すれば、従来のようなリソグラフィ法等の複雑な作製プロセスを用いずに導波路構造を作製できることから、ZnO マイクロ・ナノ結晶体は紫外微小レーザー用のビルディングブロックとして注目されている。さらに、最近では ZnO マイクロ・ナノ結晶体を利用して励起子ポラリトンやプラズモン共鳴と組み合わせた高効率な微小紫外レーザー光源の開発に関する研究も盛んになりつつある。しかしながら、様々な形状の ZnO マイクロ・ナノ結晶体のレーザー発振特性の解明はいまだ不十分であり、発振波長の制御技術も十分に確立されていない。

本論文は、各種形状を持つ ZnO マイクロ・ナノ結晶体を利用した微小共振器紫外レーザー発振特性の評価と、微小紫外レーザー光源作製に必要な ZnO マイクロ・ナノ結晶の微細加工法とハンドリング技術の開発を目的として行った研究をまとめたもので、以下の 5 章から構成される。

第 1 章は序論であり、本研究の背景および本論文の意義と概要を述べている。

第 2 章では、ZnO ナノワイヤ、ナノシート、微小球のレーザー発振機構の解明と発振特性の評価について述べている。化学気相堆積法を用いて ZnO ナノワイヤおよびナノシートを作製し、顕微分光装置を用いて光励起された単一結晶体からの微小共振器レーザー発振特性の評価を行った。ZnO ナノシートの発振閾値は、ナノワイヤの発振閾値の 1/3 程度と低く、ナノシートが優れたレーザー微小共振器として働くことを示している。さらに、大気中レーザーアブレーション法により、六方晶ウルツ鉱構造を持つ良質な ZnO 微小球の作製に成功し、光励起された単一 ZnO 微小球から明瞭なレーザー発振スペクトルと発振閾値特性を確認して、初めて ZnO 微小球結晶で紫外レーザー発振を実現している。その発振特性を解析して、微小球内部が光が周回することに起因した whispering-gallery mode (WGM)によるレーザー発振であることを示した。

第 3 章では、フォトニック結晶微小共振器によるシングルモードレーザー発振実現のために、100 nm 以下の空間分解能で ZnO ナノ結晶を加工することを目的として、focused Ga⁺ ion beam (Ga-FIB)による直接加工法と、金属マスクを用いたフレネル回折を利用する二種類のサブ波長微細加工法について実験的検討を行っている。Ga-FIB 法では、10 nm 以下に集束可能なイオンビームを用いて、ZnO ナノワイヤ上に回折格子構造を直接加工することに成功してい

るが、ZnO 結晶体の蛍光特性の消失が観測された。イオン照射後の形状・結晶性変化、スパッタ加工特性およびアニールによる蛍光回復特性について調査を行った結果、ナノ微細加工を行うために十分な加工分解能ではあるが、ZnO 結晶の脆弱性により、より軽いイオン又は電子ビームを用いた加工の必要性を指摘している。また、フレネル回折によるサブ波長加工法に関しては、3 次元電磁界分布シミュレータを用いて、波長と同程度の開口部を持つマスクを通すことで、開口部直下においてフレネル回折によりサブ波長加工が実現できる可能性があることを示している。さらに、TEA CO₂ ($\lambda=10.6\ \mu\text{m}$)レーザー光と銅グリッドマスクを用いて実証実験を行い、合成石英基板を対象に最小加工径が $3.4\ \mu\text{m}$ と、波長の 1/3 以下のサブ波長加工を実現し、本手法の有効性を示している。

第 4 章では、紫外パルスレーザー光照射によって ZnO マイクロ・ナノ結晶体が動く laser-induced motion (LIM)を応用し、外部印加電界を用いた大気中 ZnO 結晶体ハンドリング技術について述べている。LIM の原理について検討を行った結果、光吸収による ZnO 結晶表面の急激な熱膨張に起因すると結論付けられた。ナノ秒レーザー光のパルス幅の内に膨張が引き起こされるため、極めて大きな加速度が誘起され、LIM が引き起こされる。マイクロ・ナノ結晶体は、その小ささ故に取扱い・配列制御が難しく、従来の配列法としては、溶液に分散したマイクロ・ナノ結晶体を対象とする誘電泳動法等が知られている。本手法を利用することで、溶液を用いることなく大気中で適用できる新規ハンドリング技術を実現している。

第 5 章では、本研究で得られた成果をまとめ、今後の展望について述べた。

論文調査の要旨

II-VI 族化合物半導体である酸化亜鉛 (Zinc Oxide: ZnO)は、3.37 eV の大きなバンドギャップエネルギーと室温の熱エネルギー(26 meV)よりも大きな励起子束縛エネルギー(60 meV)を持ち、生体にも優しく、資源も豊富であることから、窒化ガリウムに換わる高効率な紫外発光素子材料として期待されている。また、ZnO はマイクロ・ナノ結晶体を作り易く、例えばナノワイヤ形状などの導波機能を持つ良質な結晶を自己組織的に作製できる。この性質を利用すれば、従来のようなリソグラフィ法等の複雑な作製プロセスを用いずに導波路構造を作製できることから、ZnO マイクロ・ナノ結晶体は紫外レーザー用のビルディングブロックとして注目されている。さらに、最近では ZnO マイクロ・ナノ結晶体を利用して励起子ポラリトンやプラズモン共鳴と組み合わせた高効率な微小紫外レーザー光源の開発に関する研究も盛んになりつつある。しかし、さまざまな形状の ZnO マイクロ・ナノ結晶体のレーザー発振特性は十分解明されておらず、発振波長の制御技術も十分

に確立されていない。

本論文は、ZnO マイクロ・ナノ結晶体を利用した微小紫外レーザー光源の開発を目的として、光励起された各種形状の ZnO マイクロ・ナノ結晶体のレーザー発振特性を解明するとともに、レーザー特性の制御を目指して ZnO ナノ結晶のナノ加工および ZnO ナノ結晶のハンドリング技術の開発研究の成果をまとめたもので、次の点で評価できる。

第一に、単一ナノシートのレーザー発振特性を明らかにしている。これまでに、単一 ZnO ナノワイヤのレーザー発振特性は詳しく調べられていたが、単一ナノシートのレーザー発振特性は知られていなかった。化学気相堆積法を用いて ZnO ナノシートを作製し、顕微分光装置を用いて光励起された単一 ZnO ナノシートの微小共振器レーザー発振特性を初めて評価をしている。その結果、ZnO ナノシートの発振閾値は、ZnO ナノワイヤの発振閾値の 1/3 程度と低く、ナノシートが優れたレーザー微小共振器として働くことを示している。

第二に、直径が 1 μm 程度の ZnO 微小球の作製に成功し、単一 ZnO 微小球の紫外レーザー発振を初めて実現している。ZnO 微小球については作製自体が困難であったが、大気中レーザーアブレーション法により、六方晶ウルツ鉱構造を持つ良質な ZnO 微小球の作製に成功している。これにより、光励起された単一 ZnO 微小球から明瞭なレーザー発振スペクトルと発振閾値特性を確認して、初めて ZnO 微小球結晶で紫外レーザー発振を実現している。その発振特性を解析して、微小球内部を光が周回することに起因した Whispering-Gallery Mode (WGM) によるレーザー発振であることを示した。

第三に、フォトニック結晶微小共振器によるシングルモードレーザー発振実現のために、100 nm 以下の空間分解能で ZnO ナノ結晶を加工することを目的として、集束ガリウムイオンビーム (Ga Focused-Ion Beam : Ga-FIB) による直接加工法と、金属マスクを用いたフレネル回折を利用する二種類のサブ波長微細加工法を評価している。Ga-FIB 法では、10 nm 以下に集束可能なイオンビームを用いて、ZnO ナノワイヤ上に回折格子構造を直接加工することに成功している。また、フレネル回折によるサブ波長加工法に関しては、3 次元電磁界分布シミュレータを用いて原理検証を行うとともに、TEA CO₂ レーザー光 (波長 10.6 μm) と金属製グリッドマスクを用いて合成石英基板を対象に最小加工径は 3.4 μm 、すなわち波長の 1/3 以下のサブ波長加工を実現し、本手法の有効性を実証した。

第四に、紫外パルスレーザー光照射によって ZnO マイクロ・ナノ結晶体が動く Laser-Induced Motion (LIM) と外部印加電界を組み合わせ、大気中で ZnO 結晶体をハンドリングする技術を開発している。マイクロ・ナノ結晶体は、その小ささ故に取扱い・配列制御が難しく、従来の配列法としては、溶液に分散したマイクロ・ナノ結晶体を対象と

する誘電泳動法等が知られていた。本手法を利用することで、溶液を用いることなく大気中でハンドリングできる新規技術を実現した。

以上要するに、ZnO マイクロ・ナノ結晶体を利用した微小紫外レーザー光源の開発を目的として、単一 ZnO ナノシートおよび単一 ZnO 微小球の発振特性を初めて明らかにするとともに、レーザー特性の制御に必要な ZnO ナノ結晶の微細加工技術、およびレーザー誘起による ZnO ナノ結晶の運動を利用した ZnO ナノ結晶のハンドリング技術を開発したもので、レーザー工學上価値ある業績である。よって、博士 (工学) の学位論文に値するものと認める。

氏 名 笠 原 健 司
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 491 号 (工学)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名 原子整合した金属/ゲルマニウム界面
における電気伝導特性に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 准教授 浜 屋 宏 平
(副 査) " 教 授 松 山 公 秀
" " " 中 島 寛
" " 准教授 佐 道 泰 造

論文内容の要旨

微細化技術によって高性能化を実現してきた Si 集積回路 (LSI) 技術は、近年、微細化以外の技術の積極的な導入を余儀なくされており、最近では、トライゲート構造を有するチャネル長 22 nm といった驚異的な 3D-MOSFET が搭載され始めている (図 1)。国際半導体ロードマップ (ITRS) によると、今後は Si よりもキャリア移動度の高い Ge チャネルなどが積極的に導入されると考えられている。更に、その延長上には、電子の「スピン自由度」を利用した「スピン MOSFET」といわれる次世代デバイスへの期待も高まっており、研究ベースでは既に世界中で開発競争が始まっている。仮に、Ge チャネルスピン MOSFET が実現すれば、LSI の高速化と不揮発性メモリ機能による超低消費電力化の両立が期待される (図 1)。

この Ge チャネルスピン MOSFET の実現には、①強磁性電極から絶縁トンネル障壁層を用いずに Ge 伝導帯中へスピン注入を行うこと、②金属/Ge 界面における強いフェルミレベルピンニング (FLP) 現象を回避し、Ge-MOSFET としての金属ソース・ドレイン技術を確認すること、の 2 つの大きな課題を克服することが重要である。本論文は、我々が最近実現した「原子整合 Fe₃Si/Ge(111) 界面」に注目し、Ge チャネルスピン MOSFET の実現に向けて、上記の 2 大課題を克服するための基礎研究を行なったものであり、次の 5 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本論文の研究背景と目的及び本論文の構成について述べた。

第 2 章では、絶縁トンネル障壁層を用いない n -Ge 伝導帯へのスピン注入・検出技術の可能性を探索するために、Ge 基板の表面近傍にのみ不純物 Sb を δ ドープした $\text{Fe}_3\text{Si}/n^+-\text{Ge}/n\text{-Ge}$ 構造を開発し、ショットキートンネル伝導界面を実現した。また、その構造をスピン注入・検出電極に有するデバイス構造において、3 端子 Hanle 効果測定、4 端子非局所磁気抵抗測定、2 端子磁気抵抗測定などのスピンドバイス評価を行なった。結果として、全ての測定法で明瞭なスピン信号を観測し、絶縁トンネル障壁層を用いない電気的スピン注入・検出技術を利用しても、Ge デバイスにスピン機能を発現する事が可能であることを明らかにした。残念ながら、測定温度と共に顕著に変化してしまうソース・ドレイン界面抵抗の影響を避けられず、 δ ドーピング手法を用いた界面伝導特性の不安定性の問題が明らかになった。つまり、以降に述べる金属/Ge 界面の電気伝導における FLP 問題の解決が必須であるという結論を導き出した。

第 3 章では、金属/Ge 界面の電気伝導特性における FLP 現象の起源を調べるために、原子整合した $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}(111)$ 接合の I - V 特性を詳細に調べ、接合面積(S)に大きく依存する特異な電気伝導特性を見出した。特に、 $\text{Fe}_3\text{Si}/p\text{-Ge}(111)$ 試料では、FLP の強弱が異なることを示唆する I - V 特性のバラツキが顕在化した。非常に興味深いことに、 $S = \sim 1 \mu\text{m}^2$ の試料では、“FLP が抑制された電気伝導”と“FLP に支配された電気伝導”の両者を明瞭に観測した。この現象が同一基板より作製した接合から観測されたことを考慮すると、FLP を支配する起源としては、「界面欠陥やダングリングボンド」のような外因的要素の影響が大きいと結論づけた。同様の現象が「別の原子整合界面 [$\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}/\text{Ge}(111)$]」でも確認されたため、これらの現象は、金属の種類に依るものではなく、金属/Ge 界面における原子配列の整合性が重要であるということを明らかにした。

第 4 章では、金属/Ge 界面の FLP を積極的に制御するため、Ge 表面の硫黄(S)終端処理を検討した結果、上述の特性バラツキが極端に減少し、安定な特性が得られた。これにより、FLP の主要因である外因的要素は、界面に存在する Ge 表面のダングリングボンドであると結論づけるとともに、FLP の抑制技術に新たな指針を示した。最後に、低仕事関数(Φ_m)を有する Gd を用いた $\text{Gd}/\text{Fe}_3\text{Si}/p\text{-Ge}(111)$ 構造(図 2 左)を用いて、正孔に対するショットキー障壁高さ(Φ_{Bp})の上昇を試みた結果、これまでで最も高い Φ_{Bp} (~ 0.19 eV)が得られた。最終的に、金属/ p -Ge 直接接合において、世界で初めて、 Φ_{Bp} を Φ_m で制御できる可能性を見出すことができた(図 2 右)。

第 5 章では、本論文を総括し、今後の研究課題について整理した。

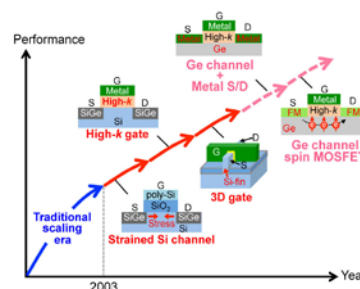


図 1. Si-LSI 技術の発展の歴史と今後の展望。

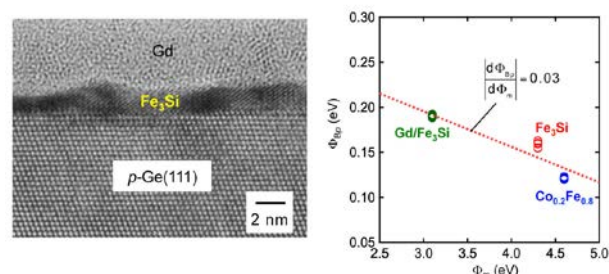


図 2. 本研究で検討した $\text{Gd}/\text{Fe}_3\text{Si}/p\text{-Ge}(111)$ 構造の例(左)と得られた成果の一部(右)。

論文調査の要旨

微細化技術によって高性能化を実現してきた Si 集積回路 (LSI) は、近年、微細化以外の技術の積極的な導入を余儀なくされており、最近では、トライゲート構造を有するチャネル長 22 nm といった 3 次元電界効果トランジスタ (MOSFET) が搭載され始めている。国際半導体ロードマップ (ITRS) によると、今後は Si よりもキャリア移動度の高い Ge チャネルなどが積極的に導入されると考えられている。更に、その延長上には、電子の「スピン自由度」を利用した「スピン MOSFET」といわれる次世代デバイスへの期待も高まっており、研究ベースでは既に世界中で開発競争が始まっている。仮に、Ge チャネルスピン MOSFET が実現すれば、LSI の高速化と不揮発性メモリ機能による超低消費電力化の両立が期待される。

この Ge チャネルスピン MOSFET の実現には、①強磁性電極から Ge 伝導帯中へ絶縁トンネル障壁層を用いずにスピン注入を行うこと、②金属/Ge 界面における強いフェルミレベルピンニング (FLP) 現象を回避し、Ge-MOSFET としての金属ソース・ドレイン技術を確認すること、の 2 つの大きな課題を克服することが重要である。本論文は、強磁性金属材料の (111) 結晶面と Ge の (111) 結晶面の原子配列が整合する事実に着目し、Ge チャネルスピン MOSFET の実現に向けて、上記の 2 つの課題を克服するための基礎研究を行な

ったものである。

本研究で得られた成果は、以下の点で評価される。

1. Fe_3Si (111) と Ge (111) の原子整合界面を利用し、 $n\text{-Ge}$ 伝導帯への絶縁トンネル障壁層を用いないスピンの注入・検出技術を検討した。 Ge 基板の表面近傍にのみ不純物 Sb を δ ドープした $\text{Fe}_3\text{Si}/n^+\text{-Ge}/n\text{-Ge}$ 構造を開発し、ショットキートンネル伝導界面を実現した。また、その構造をスピン注入・検出電極として用いたデバイス構造において、3 端子 Hanle 効果測定、4 端子非局所磁気抵抗測定、2 端子磁気抵抗測定などのスピンデバイス評価を行なった。その結果、全ての測定法で明瞭なスピン信号を観測し、絶縁トンネル障壁層を用いない電気的スピン注入・検出技術を利用しても、 Ge デバイスにおいてスピン機能を発現する事を明らかにした。また、測定温度と共に顕著に変化するソース・ドレイン界面抵抗の影響を避けられず、 δ ドーピング手法を用いた界面伝導特性の不安定性の問題も明らかにした。
2. 原子整合した $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}$ (111) 接合の I - V 特性は、接合面積に大きく依存し、特に、 $\text{Fe}_3\text{Si}/p\text{-Ge}$ (111) 試料では FLP が異なることを示唆する I - V 特性のバラツキが顕在化した。この現象が同一基板上から作製した多数の接合で観測されたことを考慮すると、FLP を支配する起源としては、界面欠陥やダングリングボンドのような外因的要素の影響が大きいと結論づけた。同様の現象が別の原子整合界面 [$\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}/\text{Ge}$ (111)] においても確認されたため、これらの現象が金属の種類に依るものではなく、金属/ Ge 界面における原子配列の整合性が重要であるということを示した。
3. 金属/ Ge 界面の FLP を積極的に制御するため、 Ge 表面の硫黄 (S) 終端処理を検討した結果、上述の特性バラツキが著しく減少し、安定な特性が得られた。これにより、FLP の主要因である外因的要素は、界面に存在する Ge のダングリングボンドであると結論づけるとともに、FLP を抑制する新たな技術指針を示した。この技術を適用し、低仕事関数 (Φ_m) を有する Gd を用いた $\text{Gd}/\text{Fe}_3\text{Si}/p\text{-Ge}$ (111) 構造を用いて、ショットキー障壁高さ (Φ_{bp}) の増大を試みた結果、従来の報告に比べて最も高い Φ_{bp} (約 0.2 eV) が得られた。最終的に、金属/ $p\text{-Ge}$ 直接接合において世界で初めて Φ_{bp} を Φ_m で制御できる可能性を見出した。

以上のように、本研究は、原子整合する金属/ Ge ヘテロ界面を利用して、「 Ge 伝導帯への絶縁トンネル障壁層を用いないスピン注入の実証」と「金属/ Ge 界面の FLP に関するメカニズムの解明」の 2 つの課題に対して実験的にアプローチし、金属ソース・ドレイン構造を有する次世代 Ge チャネルスピン MOSFET 実現の可能性を示した成果で、電

気電子工学上価値ある業績である。

よって本論文は博士（工学）の学位に値するものと認め

氏 名 北 崎 訓
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 492 号 (工学)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名 プラズマ照射によるカイワレ大根及び出芽酵母の成長促進に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教 授 白 谷 正 治
(副 査) " " 末 廣 純 也
" " 林 健 司

論文内容の要旨

近年、世界的な人口増加による食糧不足が問題視されている。今後 50 年で世界人口は 90 億人に達するが、食糧の供給率は 7% 程度しか増加しないと予測されており、90 億人の人口を養うために、70% 供給率を上げる必要がある。また、臓器移植やがん治療などへの応用に大きな期待が寄せられている再生医療においても、幹細胞から移植用臓器等を作製する期間の短縮が必要である。上述した食糧、再生医療に共通する課題に、細胞の増殖促進の実現がある。

上述した課題を解決するために、本研究ではスケラブル大気圧 DBD プラズマ源を作製し、カイワレ大根の種子及び出芽酵母に放電プラズマを照射し、成長促進実験を行った。作製したプラズマ源は、(1) 放電領域が電極間近傍に閉じ込められており、種子や細胞等の被照射物への荷電粒子の流入が抑制できる。(2) 電極の長さや数を変えることにより、放電面積を容易に大面積化できる。(3) 電極は誘電体で覆われており、放電による電極金属のスパッタリングがなく細胞を汚染しない特長を有する。作製したプラズマ源を用い、放電プラズマ照射によるカイワレ大根及び出芽酵母の成長促進効果を実証するとともに、放電プラズマ照射による成長促進機構の検討を行った。

本論文は 5 章から構成されている。第 1 章では、人口増加による食糧問題および再生医療分野における課題を述べ、放電プラズマが 2 つの課題解決に貢献できる可能性があることを説明した。続いて、医療分野で用いられている放電プラズマ技術の現状と課題を示し、最後に本研究の目的を示している。

第 2 章では、スケラブル大気圧 DBD プラズマ源の作製及び放電特性の計測、発光粒子種及び活性種密度の空間分布の測定結果を示した。本プラズマ源は、放電領域が局所的であり、細胞への荷電粒子の流入が抑制できること、発光強度は電極からの距離の増加に伴い指数関数的に減少することを明らかにし、また放電により生じる主要な活

性種である O_3 , NO , NO_2 の密度の空間分布の計測結果について述べた。

第 3 章では作製したスケラブル大気圧 DBD プラズマ源を用いたカイワレ大根及び出芽酵母の成長促進実験の結果について述べている。カイワレ大根の種子に放電プラズマ照射を行った場合、成長促進効果が照射後 3 週間以上にわたって持続すること、未照射と比較し 20% 成長が促進されることを示した。出芽酵母へ放電プラズマ照射を行った場合、誘導期が短縮し培養開始直後から出芽酵母の増殖が始まること、この期間はプラズマ照射時間によって変化することを初めて示した。また、プラズマからの光子のみの照射および O_3 および NO_2 の長時間照射では成長促進は生じないことを示した。出芽酵母の成長促進に NO の寄与は排除できないことも示した。

第 4 章では、低圧高周波プラズマ照射装置を用い、複数照射条件を一度の実験で実現できるコンビナトリアルプラズマ照射で、カイワレ大根の成長促進および成長促進機構の検討を行った結果を述べている。窒素を用いた場合は成長促進効果が得られないこと、酸素の場合において成長促進効果が大きいことを初めて明らかにした。また、プラズマ照射による種子表面のエッチングが成長促進に寄与するのではなく、酸素プラズマ中の活性酸素ラジカルが、活性酸素として種子に作用し、酸化ストレスにより成長が促進されることを初めて明らかにした。

第 5 章では本研究によって得られた結論をまとめ、今後の課題について述べている。

論文調査の要旨

近年、世界的な人口増加による食糧不足が問題視されている。今後 50 年で世界人口は 90 億人に達すると予測されているが、食糧の供給率は 7% 程度しか増加しないと予測されており、90 億人の人口を養うために、70% 供給率を上げる必要がある。また、臓器移植やがん治療などへの応用に大きな期待が寄せられている再生医療においても、幹細胞から移植用臓器等を作る期間の短縮が必要である。上述した食糧、再生医療に共通する課題に、細胞の増殖促進の実現がある。

本論文は、放電プラズマ技術による細胞の高速増殖の可能性を探索した結果をまとめている。具体的には、モデル生物としてカイワレ大根と出芽酵母を用い、プラズマ照射による成長促進効果の実証を目的として研究を行ったものである。本研究で得られた成果は、以下の点で評価される。

1. 大気圧では通常は難しい大面積化が可能な大気圧プラズマ源を実現し、その放電特性、生成粒子濃度の空間分布を明らかにした。また、少ない実験回数で良好な照射条件と反応機構に関する知見を得ることが出来るコンビナトリアル手法を適用可能な低圧プラズマ

源を実現した。

2. カイワレ大根の種子へのプラズマ照射により、発芽後 1 週間にわたり成長促進効果が持続すること、大気圧プラズマ源では 3 分間の照射で 1.2 倍、低圧プラズマ源では 60 分間の照射で 1.7 倍の成長促進が可能なことを明らかにした。一方、出芽酵母へのプラズマ照射では、成長促進効果は誘導期短縮に限られること、照射時間 2 分以下では誘導期が短縮されること、3 分以上では成長が抑制されることを明らかにした。
3. 生成粒子濃度と成長促進の相関から、カイワレ大根の成長促進には活性酸素ラジカルが寄与している可能性が高いこと、出芽酵母の誘導期短縮には活性酸素ラジカルは寄与していない可能性が高いことを示した。カイワレ大根の成長促進では、細胞サイズの変化では無く細胞数増加が生じていること、種子細胞内のチオール基の増加が成長促進に関与している可能性があることを示した。

以上のように、種子等へのプラズマ照射に使用する大面積化が可能な大気圧プラズマ源と低圧プラズマ源を開発し、種子へのプラズマ照射が種子植物の成長促進に有効な場合があること、プラズマ照射による出芽酵母の効果は誘導期に限られることを初めて示しており電気電子工學上価値ある業績である。よって本論文は博士(工学)の学位に値するものと認める。

氏 名 藤 本 准 一
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 493 号 (工学)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名 炭酸ガスレーザによる錫プラズマ生成方式極端紫外光源の高効率化・長寿命化に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教 授 岡 田 龍 雄
(副 査) " " 白 谷 正 治
" " " 内 野 喜 一 郎

論文内容の要旨

現代の高度情報化社会のさらなる推進には、高密度半導体集積回路(LSI)寸法の更なる微細化による LSI 素子の高機能化が不可欠である。光リソグラフィは、LSI 回路パターンを写真製版の原理によりウエハ上に転写する技術であり、LSI 製造において回路の微細化を支配する基盤技術である。光リソグラフィにおいて、微細化の性能は基本的には使用する光源の波長によって制限される。現在、最先端の光リソグラフィ装置には、波長 193 nm の ArF エキシマレーザが使用されているが、LSI のさらなる微細化には、より短波長の光源を用いる光リソグラフィ装置の開発が必

要不可欠である。このような背景のもと、パルス炭酸ガスレーザー照射によって錫プラズマを生成する (LPP: Laser Produced Plasma)方式を用いた波長 13.5 nm の極端紫外線 (EUV: Extreme Ultraviolet)光源が、次世代の光リソグラフィ用光源として期待されている。

本論文は、LPP 方式による EUV 光源装置の開発において、装置規模を規定する EUV 発光効率の向上、および装置寿命を制限する最大の要因の一つである集光ミラーへの錫の付着に起因する反射率の低下を防止することを目的として、錫液滴のレーザーエネルギーの吸収特性および EUV 光への変換過程の解明と、磁場を用いた錫イオンの付着防止機能に関する研究成果をまとめたもので、以下の 6 章から構成される。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景および本論文の意義と概要を述べている。

第 2 章において、EUV 光源装置の構成について述べるとともに、EUV 光源の主要構成装置であるパルス炭酸ガスレーザーの構成と性能について詳述した。小出力のパルス炭酸ガスレーザー発振器に市販の連続発振用炭酸ガスレーザーを増幅器として用いる MOPA(Master Oscillator Power Amplifier)方式を採用して、EUV 光を生成するレーザーパルス出力として最大 7.6kW、パルス幅 15nsec、繰り返し周波数 100kHz の性能を得るとともに、ビーム品質や安定性などの特性を評価している。

第 3 章では、ダブルパルス照射方式において炭酸ガスレーザーを照射する前に照射するプリパルスレーザーが錫液滴に与える効果について述べている。プリパルスレーザーによる錫液滴の形状変形をシャドウグラフ法で観察して、粒子法を用いたシミュレーションの結果と比較している。その結果、直径 20 μ m の錫液滴に波長 1.06 μ m プリパルスレーザーを照射することにより、錫液滴の形状を炭酸ガスレーザーの照射に適した円板状に変形させることができることを実証した。また、レーザー誘起蛍光(LIF)法を用いて錫の中性粒子の時空間分布についてもその特性を明らかにした。プリパルスレーザーで円板状に分散した錫にパルス炭酸ガスレーザーを照射した時、錫の微小液滴や錫の中性粒子が消失して錫イオンに変換できることを実証した。一定以上のパルス炭酸ガスレーザーエネルギーを照射することにより、イオン化率 93%程度で錫を安定にイオン化できることを確認した。

第 4 章では、パルス炭酸ガスレーザーのエネルギーから EUV 光への変換の過程について実験的検証を行った。まず、パルス炭酸ガスレーザーのエネルギーが錫ターゲットに照射された後どこで消費されるのかを計測し、プリパルスレーザーを用いることで最大 68%のエネルギーが錫に吸収されることを検証した。また、プリパルスレーザーを照射して錫液滴が円板状に分散され、その直径がパルス炭酸ガスレーザーの集光点にて集光径 300 μ m をやや超える径まで膨張

した時点で、円板状の直径膨張方向と直交する方向からパルス炭酸ガスレーザーを照射すると変換効率が最大になる結果を得ることができた。次に、プリパルスレーザーのエネルギーは同等のままパルス時間幅を 10nsec から 10psec に短パルス化すると、変換効率がさらに向上して錫液滴を用いて世界最高の変換効率 4.7%を得ることができた。シャドウグラフ法により錫の分散状況を確認すると錫の微小液滴がナノ秒の照射よりもより細かく、より早く分散膨張していることが観測された。錫の微小液滴の径がより細くなることによりパルス炭酸ガスレーザーエネルギーの吸収がさらに増加して、それが変換効率の向上に寄与したと考えられる。

第 5 章では、集光ミラーへの錫付着による汚損・反射率低下防止法として提案されている磁場による錫イオンの閉じ込めの効果を検証した。検証装置にて直径 20 μ m の錫液滴にダブルパルス照射して錫をイオン化し、その錫がどの方向へ飛散していくかを磁場の強度を変化させて計測した。その結果、磁場を印加することにより 98%以上の錫イオンを磁場内に閉じ込めることができることを実証した。また、磁場による錫飛散防止技術の有用性を実機レベルの装置でも検証した。すなわち、磁場をプラズマ生成点およびその周辺に印加することにより、実用機と同じ 100kHz のパルス動作においても EUV 光集光ミラー上において錫イオン信号は観測されないことを確認し、磁場印加が集光ミラーへの錫付着を防止してミラー寿命を延長させる効果があることを検証した。

第 6 章では、本研究で得られた成果をまとめ、今後の展望について述べた。

論文調査の要旨

現代の高度情報社会のさらなる推進には、大規模半導体集積回路 (LSI) 寸法の更なる微細化による LSI 素子の高機能化が不可欠である。光リソグラフィは、LSI 回路パターンを写真製版の原理によりウエハ上に転写する技術であり、LSI 製造において回路の微細化を支配する基盤技術である。光リソグラフィにおいて、微細化の性能は基本的には使用する光源の波長によって制限される。現在、最先端の光リソグラフィ装置には、波長 193 nm の ArF エキシマレーザーが使用されているが、LSI のさらなる微細化には、より短波長の光源を用いる光リソグラフィ装置の開発が必要不可欠である。

本論文は、次世代の光リソグラフィ用光源として期待される波長 13.5 nm の極端紫外線 (EUV: Extreme Ultraviolet)光源の開発を目的に、パルス炭酸ガスレーザー照射によって生成した錫プラズマからの EUV 光を利用する LPP (Laser Produced Plasma)方式を用いた光源装置の開発において、装置規模を規定する EUV 発光効率の向上、および装置寿命を制限する最大の要因の一つである錫によ

る集光ミラーの汚損防止に関する研究成果をまとめたもので、次の点で評価できる。

第一に、ダブルパルス LPP 方式を提案して、錫液滴の形状を炭酸ガスレーザの照射に適した形状に制御する手法を開発している。LPP 方式において、錫によるミラーの汚損防止のため錫液滴は発光に必要な最小限の寸法にする必要があり、一般にその寸法は炭酸ガスレーザの集光径よりも小さくなる。そのため、効率の良い EUV 光の生成には、炭酸ガスレーザを照射する前にプリパルスレーザを錫液滴に照射して、錫液滴の寸法と形状を炭酸ガスレーザの照射に適した寸法と形状に制御する必要がある。著者は、プリパルスレーザが照射された錫液滴の形状変形をシャドウグラフ法で観察して、粒子法を用いたシミュレーションの結果と比較し、直径 $20\mu\text{m}$ の錫液滴に波長 $1.06\mu\text{m}$ プリパルスレーザを照射することにより、錫液滴の形状を炭酸ガスレーザの照射に適した円板状に変形させることができることを実証している。

第二に、レーザ照射された錫液滴の挙動をレーザ誘起蛍光 (LIF: Laser Induced Fluorescence) 法を用いて解明している。LPP 方式では、レーザ照射によりプラズマ化した錫液滴からの飛散物が EUV 光集光用ミラーに付着してミラーの反射率低下、ひいては装置寿命を制限することが大きな問題になっている。LIF 法を用いて錫の中性粒子の時空間分布を計測し、プリパルスレーザで円板状に分散した錫にパルス炭酸ガスレーザを照射した時、錫の微小液滴や錫の中性粒子が消失して錫イオンに変換できることを実証した。一定以上のパルス炭酸ガスレーザエネルギーを照射することにより、イオン化率 93%程度で錫を安定にイオン化できることを確認した。これは、プラズマ化した錫を磁場により制御する可能性を示唆する工学上重要な知見である。

第三に、パルス炭酸ガスレーザのエネルギーから EUV 光への変換の過程について実験的検証を行い、パルス炭酸ガスレーザのエネルギーが錫ターゲットに照射された後どこで消費されるのかを計測し、プリパルスレーザを用いることで最大 68%のエネルギーが錫に吸収されることを明らかにした。さらに、プリパルスレーザのエネルギーは同等のままパルス時間幅を 10nsec から 10psec に短パルス化すると変換効率が向上することを見出し、これにより世界最高の変換効率 4.7%を達成している。

第四に、集光ミラーへの錫付着による汚損・反射率低下防止法として提案されている磁場による錫イオンの閉じ込めの効果を実証した。磁場を印加した検証装置において直径 $20\mu\text{m}$ の錫液滴にダブルパルス照射して錫をイオン化し、錫の飛散状況を磁場の強度を変化させて計測した。その結果、磁場を印加することにより 98%以上の錫イオンを磁場内に閉じ込めることができることを実証した。さらに、実用機と同じ 100kHz のパルス動作においても磁場印加時

には EUV 光集光ミラー上において錫イオン信号は観測されないことを確認し、磁場印加が集光ミラーへの錫付着を防止してミラー寿命を延長させる効果があることを実証した。

以上要するに、次世代の光リソグラフィで必要とされる EUV 光源の開発を目的とし、パルス炭酸ガスレーザ照射によって生成した錫プラズマからの EUV 光を利用する LPP 方式において、ピコ秒のプリパルスレーザと炭酸ガスレーザを錫液滴に照射するダブルパルス方式を開発して世界最高の EUV 変換効率を達成するとともに、磁場印加が集光ミラーへの錫付着を防止してミラー寿命を延長させる効果があることを実証している。本論文は、それらの成果をまとめたもので、レーザ工学上価値ある業績である。よって、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏 名	山 田 晋 也
学 位 記 番 号	シ情 博甲第 494 号 (工学)
学位授与の日付	平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名	分子線エピタキシー技術による Fe ₃ Si-Ge 高品質ヘテロ構造の 結晶成長に関する研究

論文調査委員

(主 査)	九州大学	准教授	浜 屋 宏 平
(副 査)	〃	教 授	浅 野 種 正
〃	〃	〃	白 谷 正 治
〃	〃	准教授	佐 道 泰 造

論 文 内 容 の 要 旨

近年、半導体業界では、従来の横型 Si-MOSFET の微細化に依存しない「異種技術や異種材料との融合による Si-LSI の高性能化」を目指した研究が活発に行われている [図 1(a)]。特に、Si よりも高いキャリア移動度を有する Ge が代替チャネル材料としては有望視されている。しかし、この Ge は不純物固溶度が Si よりも一桁低く、その拡散速度も非常に早いため、ソース・ドレイン領域を従来の不純物拡散層を用いた p-n 接合とすることは非常に難しい。そのため、金属材料を利用した「金属ソース・ドレイン MOSFET」とすることで、問題を一気に克服しようという試みがある。一方で、金属-Ge 接合では、界面状態に依存した電気伝導特性が発現することが知られており、その接合界面を原子層レベルで制御することが極めて重要であると考えられている。

我々はこれまで、分子線エピタキシー(MBE)技術を利用して、Ge(111)基板上に規則合金化した金属シリサイド (Fe₃Si)の原子層制御エピタキシャル成長を実現しており、その接合界面は原子層レベルで平坦であるという実験事

実を得ている。しかし、その根幹となる結晶成長機構は未だ不明瞭なままであり、自在に制御できるレベルに到達していない。今後、金属-半導体接合を利用したデバイス開発が国内外で活発に行われていく上で、この結晶成長物理を探求し、メカニズム解明の足がかりをつかむことができれば、金属-半導体ヘテロ構造を自在に制御した次世代エレクトロニクスデバイスの実現につながると考えられ、極めて優位な圧倒的新技術となる期待がある。

本論文では、我々の MBE 技術における金属-半導体ヘテロ構造の結晶成長物理のメカニズムを解明し、自在に制御することで、高品質な金属-半導体ヘテロ構造を有する新しい縦型デバイス構造などを提案することを目的として研究を行ったものであり、次の 5 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本論文の研究背景と目的、及び本論文の構成について述べた。

第 2 章では、我々の MBE 成長条件下における Fe_3Si の結晶規則化メカニズムを中心に探索した。成長温度やポストアニール温度をパラメータとして、 $\text{Ge}(111)$ 基板上への Fe_3Si 合金の規則合金化の詳細を探索した。結果として、この系における「熱エネルギー」の追加は、 $\text{Fe}_3\text{Si-Ge}$ ヘテロ界面における相互原子拡散を誘発する方向へしか作用しないことが判明し、『 Fe_3Si と Ge の (111) 面における原子マッチング[図 1(b)]』と『 Fe 原子と Si 原子の厳密な組成制御』さえ実現すれば、「室温」MBE 条件下においても原子層レベルで高品質な界面を有したまま「室温規則合金」が実現することを発見した。上記の 2 つが実現する「 $D0_3$ 規則合金化に対する初期エネルギー位置」は、そのエネルギー障壁を相対的に大幅に下げているため、室温規則合金化という常識を覆す結晶成長と高品質界面の両立が実現したと考察した。

第 3 章

が極めて重要であると考えられている。

これまで、分子線エピタキシー(MBE)技術を利用して、Ge(111)基板上に規則合金化した金属シリサイド(Fe_3Si)の原子層制御エピタキシャル成長が実現されており、その接合界面は原子層レベルで平坦であるという実験事実が得られている。しかし、その根幹となる結晶成長機構は未だ不明瞭なままであり、自在に制御できるレベルに到達していない。今後、金属-半導体接合を利用したデバイス開発が国内外で活発に行われていく上で、この結晶成長物理を探索し、メカニズム解明の足がかりをつかむことができれば、金属-半導体ヘテロ構造を自在に制御した次世代エレクトロニクスデバイスの実現につながると考えられ、極めて優位な新技術となる期待がある。本論文は、MBE 技術における金属-半導体ヘテロ構造の結晶成長物理のメカニズムを解明し、自在に制御することで、高品質な金属-半導体ヘテロ構造を有する新しい縦型デバイス構造などを提案することを目的として研究を行ったものである。本研究で得られた成果は、以下の点で評価される。

1. Ge(111)基板上への Fe_3Si 合金の規則合金化の詳細を、成長温度やポストアニール温度をパラメータとして探索した。結果として、この系における熱エネルギーは、 $\text{Fe}_3\text{Si-Ge}$ ヘテロ界面における相互原子拡散を誘発する方向へしか作用しないことが判明し、「 Fe_3Si と Ge の(111)面における原子マッチング」と「Fe 原子と Si 原子の厳密な組成制御」さえ実現すれば、室温 MBE 条件下においても原子層レベルで高品質な界面を有したまま規則合金化が進行することを発見した。上記の 2 条件下の初期エネルギー位置は、相対的に Fe_3Si の規則合金化に対するエネルギー障壁を大幅に下げているため、 Fe_3Si の室温規則合金化と $\text{Fe}_3\text{Si-Ge}$ 界面の高品質形成の両立が実現した。つまり、これまで不明瞭であった $\text{Fe}_3\text{Si-Ge}$ 高品質界面形成のメカニズムに対して重要な知見を得た。
2. 上記の成果を基礎とし、MBE 技術を利用して $\text{Fe}_3\text{Si}(111)$ 表面のみを規則化させるため、Si 単原子層終端を施した表面上に Ge 薄膜の低温成長を試みた。200~400℃という傾斜温度成長技術を併用することで、金属である Fe_3Si 上に極めて良好且つ大面積の単結晶 Ge 薄膜をエピタキシャル成長することに成功した。この結果を、Fe 単原子層終端表面上の Ge 薄膜成長の結果と比較することにより、「Ge

の単結晶化に対する成長初期のエネルギー位置」が単一原子層終端でチューニングされたものであると結論づけた。低温で金属-半導体ヘテロ構造を実現するためには、上記のよう成長表面の制御が極めて有効であることが明らかとなり、 $\text{Fe}_3\text{Si-Ge}$ 界面形成状態を自在に制御することに世界で初めて成功した。

3. 上記 1,2 で検討した内容を組み合わせて、縦型 Ge チャネル金属ソース・ドレイン MOSFET の基礎となる「 $\text{Fe}_3\text{Si-Ge-Fe}_3\text{Si-Si}$ 」構造の高品質作製に挑戦し、優れた結晶性・電気特性を取得した。まさに、低温 MBE のメカニズムへのアプローチから実現した高品質金属-半導体人工ヘテロ構造の創製であり、世界初の新しい縦型デバイスの基本となる構造の実証である。

以上のように、本研究は、MBE技術における金属-半導体ヘテロ構造の結晶成長物理のメカニズムを解明し、それを基礎とした制御手法を開発したことで、高品質な金属-半導体ヘテロ構造を有する新しい縦型デバイス構造の提案へと結実した成果で、電気電子工学上価値ある業績である。

よって本論文は博士(工学)の学位に値するものと認める。

氏 名 梁 時 熏
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 495 号 (学術)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名 LLC Resonant DC-DC Converter
with Low-Profile and Bi-Directional
Power Flow
(LLC共振形DC-DCコンバータの薄形
化・双方向化に関する研究)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教 授 庄 山 正 仁
(副 査) " " 村 田 純 一
" " " 岩 熊 成 卓

論文内容の要旨

This dissertation addresses various issues related to LLC resonant converters. It aims at achieving a low-profile circuit and operating characteristics of bi-directional LLC resonant converter for green energy systems.

Recently, switch mode power supplies (SMPs) are used

in various applications such as home appliances, Photovoltaic (PV) systems and Electric Vehicles (EVs). In SMPS, a key point is to achieve high power density, high efficiency and low noise. To achieve both high efficiency and high power density, the converter needs to realize soft-switching operation. Among various soft-switching dc-dc converters operating at a high frequency, the LLC resonant converter is widely used because of following several advantages:

The LLC resonant converter has high conversion efficiency at a wide input voltage range. The converter can realize zero-voltage switching (ZVS) turn-on of main switches and zero current switching (ZCS) turn-off of the rectification diodes. Another advantage of the converter is that the leakage inductance of the transformer can be used as a resonant inductance. Therefore, power density of the converter will increase.

On the other hand, there are some problems with LLC resonant converter in practical applications. One of the problems is that the transformer generates heat by operating the converter using a flat transformer at high frequency, because its losses increase with higher switching frequency and becoming lower section area of the core. This problem gets in the way of achieving high power density converter.

And, the bi-directional LLC resonant converter is one of the profitable converters for the bi-directional power conditioner to achieve high efficiency, low noise and compact size. So far, a detailed analysis of the LLC resonant converter for forward operating mode has been discussed. However, the operating characteristics of reverse direction mode have not been clarified yet.

This research presents design method of the LLC resonant converter using flat transformer for temperature reduction and analysis for the operating characteristics of reverse direction mode for bi-directional LLC resonant converter.

The thesis consists of five chapters. These chapters can be summarized as follows:

Chapter one describes overview of SMPS. Furthermore, switching loss, soft-switching techniques and resonant converter are explained.

Chapter two presents concepts of LLC resonant converter. It describes the details of operating characteristics for the converter, which are impedance characteristics, soft-switching region, voltage conversion ratio, and operation analysis. Next, design parameters of resonant network in the converter are investigated.

Chapter three investigates the design of a flat transformer for reducing operating temperature. Magnetic

flux distribution in core is studied by using MAXWELL 3D, which is electromagnetic field simulator. Two transformers converter is designed for reducing its losses per one transformer. It considers how to connect to primary and secondary winding wire. Next, the transformer losses depending on the number of the winding turns and switching frequency are estimated. Finally, a 400W half-bridge implementation has been suggested for achieving the experimental validations and for realizing the studied concepts. The low-profile power module of a thickness of about 14mm could be built up by using flat transformer and devices.

Chapter four investigates the operating characteristics of bi-directional LLC resonant converter for reverse direction mode. The operating characteristics of reverse direction mode are analyzed based on fundamental harmonic approximation (FHA) method. This chapter presents the ac analysis of reverse direction mode. From ac analysis, impedance characteristics, soft-switching region and voltage conversion ratio of the reverse direction mode are discussed in some detail. Also, the circuit operation of the reverse direction mode is investigated. Finally, experimental results are shown to confirm operating characteristics of reverse direction mode.

Chapter five includes the final conclusions outline for this thesis.

論文調査の要旨

近年、スイッチング素子を高速にオンオフさせて電力変換とその制御を行うスイッチング電源 (DC-DC コンバータ) は、小形・軽量・高効率である特長を持つため、テレビに代表される家庭用電化製品はもとより、太陽光発電システム、電気／ハイブリッド自動車など、様々な電気電子機器で使用されている。DC-DC コンバータの回路方式としては種々のものがあるが、最近、2 個の共振用インダクタ (L) と 1 個の共振用コンデンサ (C) を用いた「LLC 共振形」と呼ばれる DC-DC コンバータの回路方式が、更なる小形化・軽量化・高効率化および低ノイズ化が期待できるコンバータ回路として注目されている。

ところが、この LLC 共振形コンバータは、実際の適用において、次のような問題が存在する。(1) 例えば薄形ディスプレイ用スイッチング電源として薄形のトランスを用いた LLC 共振形コンバータを高いスイッチング周波数で動作させた場合、トランスの鉄損や銅損がスイッチング周波数の高周波化に伴って増加し、特に鉄損はトランスが薄形でコアの断面積が小さくなる程、増加が著しくなる。このことが、高電力密度化を進める場合の大きな問題となっている。(2) 太陽光発電システム、電気／ハイブリッド

自動車など、蓄電池を活用した電力システムにおいて、蓄電池の充放電が 1 台で可能な双方向コンバータとして LLC 共振形を用いることが考えられるが、逆方向に電力が伝送される場合、回路動作および動作特性は複雑となり、これまで明らかにされていない。

本研究は、以上の問題を解決するため、LLC 共振形コンバータに用いられる薄形トランスの低損失化に向けた設計方法を明らかにすると共に、LLC 共振形コンバータを双方向コンバータとして用いた場合における逆方向の回路動作と動作特性を明らかにしたもので、次の点で評価できる。

第一に、LLC 共振形コンバータにおけるトランスの損失を低減して動作温度を下げるため、2 個の薄形トランスを用いることを提案し、トランスのコアの磁束分布を電磁界シミュレータにより詳細に解析し、磁束密度の上昇を抑えることにより低損失化を図っている。さらに 2 個の薄形トランスの巻線数と接続方法、およびスイッチング周波数がトランスの鉄損・銅損に及ぼす影響を詳細に調べ、低損失化に向けた設計法を明らかにしている。その結果、この設計法による試作実験において、400W のハーフブリッジ方式 LLC 共振形コンバータの厚みが 14mm まで薄くなり、96.5% の高い変換効率と $1.86\text{W}/\text{cm}^3$ の高い電力密度が得られている。

第二に、LLC 共振形双方向コンバータについて、特に電力が逆方向に伝送される場合の回路動作と定常的な動作特性について詳細な解析を行っている。具体的には、LLC 共振回路部の入出力インピーダンス特性について基本波近似 (Fundamental Harmonics Approximation:FHA) 法を用いて解析することにより、コンバータ回路の電圧変換率やソフトスイッチング動作範囲などの基本動作特性を初めて明らかにするとともに、解析結果の妥当性を実験により検証している。

以上要するに、本論文は、LLC 共振形コンバータに用いられる薄形トランスの低損失化に向けた設計方法を明らかにすると共に、LLC 共振形コンバータを双方向コンバータとして用いた場合における逆方向の回路動作と動作特性を明らかにしたものであり、電気電子工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士 (学術) の学位論文に値するものと認める。

氏 名 吉 岡 宏 晃
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 496 号 (工学)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学 位 論 文 題 名 集積化を指向した無機および有機材料における広帯域レーザー媒質の高機能化に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 准教授 興 雄 司
(副 査) " 教授 岡 田 龍 雄
" " 澤 田 廉 士

論 文 内 容 の 要 旨

最近のレーザー工学の研究はハイパワー、広帯域、超短パルスの三方向に研究が先鋭化してきており、この中でも短パルスとそれによる高ピークパワーの光はレーザー加工・テラヘルツ発生・レーザー表面処理・ガラス内部処理・超高速現象解明・核融合添加等様々な先端応用が実証・実用化されている。短パルス発生には、光増幅できる周波数帯域が広い、いわゆる広帯域レーザー媒質と、これをモード同期動作させるための極めて高い光制御技術が必要であり、特に前者に於いては、現在も固体無機酸化物結晶を主体とした、新規開発・材料探索の研究が活発に行われている。

一方でエレクトロニクスの分野ではリソグラフィーによる最密集積技術の次の技術として低負荷オンデマンド実装などを可能とするプリンタブルデバイスという新しいフェーズに向けての研究開発が盛んである。これはこれまでのシリコン+リソグラフィの切り開いたチップデバイスに対して、オンデマンド・ローコスト・多分野ハイブリッドなどの新しい付加価値を見いだすためのアプローチであり、ウェアラブル・大面積低価格・センサネットワークデバイス・生体親和性デバイス・グリーンテクノロジー・環境低負荷デバイスなどにエレクトロニクスが進出する上で不可避なフェーズではないかと考えられる。

こうした現状を鑑み、レーザーを代表とする光デバイスを見ると、既に有機増感・フィルム型バルクヘテロ太陽電池や有機断面積 EL 表示器及び照明など、有機材料あるいは有機無機ハイブリッドによりプリンタブルフェーズを指向した研究はスタートしている。一方レーザーを代表とするコヒーレント型光デバイスも将来的にそのフェーズに移って行くであろう事は想像に難くないが、超短パルス発生を実施できる広帯域レーザー材料・装置の研究開発では特に、ファイバーレーザーによるシステムの折りたたみ程度で有り、プリンタブルというようなフェーズの研究は遅れている。

本論文では、これから本格化するレーザーデバイスの小型化・集積化に於いて、プリンタブルを指向したレーザー材料の機能性付加を目的とし、無機・有機双方からの三種類のアプローチにより超短パルス発生可能なレーザー媒質の研究を行った成果をまとめた。

第一には、無機酸化物の固体結晶において広帯域・超短パルスレーザー媒質の代表である Yb:YAG のセラミック焼結体に関する研究である。Yd:YAG は従来の典型的な Ti:Sapphire 結晶と異なり半導体レーザーで励起できる特性を持つため、元来小型化・簡略化が可能とされた。セラミックは材料をパターニングして焼結することで任意の形状

を作り出すことも可能とされており、将来的には小型・集積性の高い小型レーザ構造を、結晶利用するより容易に得ることが期待される。筆者はこの両者を組み合わせて将来的に高機能化が可能なるための基礎研究として、Yb:YAG セラミックとした新材料を用いた研究を行った。成果としては、世界で初めてモード同期発振を行う事に成功し、二波長同時モード同期という特異な現象も報告した。アプローチの詳細としては、まずは単純なレーザ発振器を構成して、先ずその効率と広帯域性を評価して 992 nm ~ 1111 nm の広帯域の波長可変域を得た。こうした帯域の幅は超短パルス化のポテンシャルを測る上で重要である。さらに、初めての半導体励起フェムト秒 Yb:YAG セラミックレーザの実現では、パルス幅 233 fs を得た。これは当時カーレンズモード同期を除いて最も短い値である。加えて、同システムをベースに、ある条件下で二つの強いレーザ利得ラインである波長 1033.6 nm および 1047.6 nm において同一ビーム中にモード同期が同時に起こる事を見だし、この二波長同時モード同期を Yb 添加固体レーザとして初めて報告した。

第二に、ランタノイド系イオンを錯体化することで有機材料と混合する、というアプローチに於いてこれまでにない広帯域性と発振強度を示す Nd^{3+} -(Trifluoroacetic acid)₃ 錯体を見だし、その特性を報告した。通常無機媒質中でしか扱えないランタノイド系イオンは、これまでたびたび錯体化されて有機無機ハイブリッド材料として研究されてきたものの、良い特性を示すものは発見されていなかった。筆者は新規合成された Nd^{3+} -TFA 錯体について、光学特性・基礎レーザ発振・マイクロチップ固体レーザ発振評価を行った。 Nd イオンは一部を除き狭帯域でモード同期特性に大きく劣るが、 Nd^{3+} -TFA 錯体の基礎レーザ特性評価では波長 1055 nm において半値幅約 30 nm の広帯域発光の機能が付加されていることが確認できた。発振評価では、液体ベースで 20% のスローブ効率が得られ、これは Nd 錯体の発振としては世界二例目、一例目の 10 倍の効率である。加えて、高屈折率アミド系新材料ポリマー HPDA を組み合わせた固体化にも成功した。 Nd^{3+} -TFA は波長可変レーザや超短パルスレーザなど各種機能性レーザへの応用が十二分に期待される。

第三に、有機蛍光分子を固体フェーズで利用する際の劣化問題を飛躍的に改善する高機能化のアプローチとして、固体マトリックス中をドーパントが移動できる全く新しい概念の光機能媒質を提言・実装した。内部循環を可能にするのはシリコン系有機材料のポリジメチルシロキサン (PDMS) と、それが持つナノポーラス媒質構造である。このナノポーラス材料を用いた劣化退色回復機能を有する有機固体色素分布帰還レーザの基本特性の評価について、赤色 P597:PDMS/PTFEMA レーザを作製し実験的かつ理論的に評価を行った。その結果、色素内部循環機能をもたな

い従来型の 20.5 倍の動作耐久寿命が達成された。さらに、PDMS が一般的な極性色素分子を溶解しない問題にも着目し、一部をシリコンと置換した色素を新たに設計して、評価を行った。ここでも 20 倍の寿命改善が確認されたほか、分子設計への PDMS 溶解機能性の発現の手法や、光特性・PDMS 中拡散特性への影響なども明らかになった。

このように、無機に於いては集積プロセスが可能な媒質による超短パルスレーザ発振を達成し、有機無機ハイブリッドの錯体に於いては有機媒質での広帯域レーザ媒質を確認し、有機色素の広帯域ではこれまでに例を見ない分子流動・拡散型固体媒質を利用したレーザ動作を確認し、次世代および次々世代に向けた広帯域レーザの研究に於いて非常に重要な成果を得た。

論文調査の要旨

広い可変波長域を持つレーザ媒質に高度な共振器技術を適用してモード同期を行い、結果得られる超短パルスレーザは、高時間分解能・高強度電界により加工・通信・医療・分析など様々な分野で活躍している。超短パルスレーザを組み込み可能な小型光源としてさらに発展させる試みは、光ファイバー技術や半導体高出力化技術などを通じて継続的に行われているが、長期的な発展や応用分野の間口を広げるためには、広帯域レーザ材料自身の探求も必要である。従来の超短パルスレーザは無機系材料が主流であったが、今後、レーザの集積化・デバイス化が必要とされることから、エレクトロニクス分野に見るような印刷的技法での集積化が可能な非結晶型、あるいは自己組織結晶型の広帯域レーザ材料研究が重要になる。特に、無機材料に捕らわれず、室温で液相プロセスが可能な有機材料・有機無機ハイブリッド材料などの幅広い材料の研究は必須である。

本研究では集積化を指向した 3 種類の新しい非結晶型の広帯域レーザ媒質が提示され、それぞれ、モード同期動作に関する知見、従来にない高出力を可能にした錯体媒質の発見と評価、固相内分子拡散・循環という特異な現象を利用したデバイス耐久性の向上、という新しい研究成果が報告・論じられている。

本研究で得られた成果は、以下の点で評価できる。

1. ランタノイドのイッテルビウムイオンをドーブルした YAG を液相セラミック焼結法で作製する事で、単結晶並みの光学的特性を得ることに成功した。この優れた材料を利用することで、世界的にも最も広い波長帯域を実験的に確認した後、Yb:YAG セラミックでモード同期発振に世界で初めて成功し、発表当時世界で最も短いパルス幅である 233fs を報告した。さらに共振器構造を最適化する中で、Yb:YAG レーザが持つ広い帯域の両端で、独立して二つの波長でモードロック動作が得られるユニークな二波長モード同期レーザ

一動作を発見した。

2. ネオジムイオンをフッ素系配位子で修飾した Nd-TFA 錯体を作製し、これを液体レーザーとして評価したところ、錯体としてこれまでにない高出力発振とネオジムイオンでありながら波長幅で 30nm 近い広帯域発振を世界で初めて確認した。ネオジムイオン錯体によるレーザー発振としては世界二例目、発振効率は世界最大である。さらに、この材料が非常に固体プラスチックと混ざりにくい問題の解決を試み、低温プロセス・高濃度液相プロセスが可能なハイパーブランチャミド系粒子型の新規開発ポリマーが有効であることを見だし、両者を組み合わせたプラスチックマイクロチップの広帯域発振も実験的に確認した。
3. ポリジメチルシロキサンというエラストマー内部に 2~3nm 程度の大きさの分子を分散させると、分子が低速ながら固相媒質の中を拡散していく固相拡散現象をレーザー色素分子において初めて定量的に評価し、これをレーザーデバイスにおける色素の光劣化対策に利用するという提案を行った。実際に必要濃度まで拡散しうる既存材料を探索・発見すると同時に、得られた知見を元に分子構造を設計して分散できる色素分子も新たに開発した。さらに拡散過程や拡散速度に関する理論的・実験的考察を行い、拡散モデルを構築した。モデルを元に実験デバイスを試作しレーザーの長寿命化・自己回復を達成した。

以上、本研究では集積化を指向した 3 種類の新しい非結晶型の無機、有機無機ハイブリッド、有機の広帯域レーザー媒質が提示され、そのそれぞれについて、モード同期動作に関する知見、従来にない高出力を可能にする錯体媒質の作製と評価、固相内分子拡散・循環という特異な現象を利用したデバイス耐久性の向上、という新しい科学的知見が報告されており、広帯域レーザー材料の研究領域において有用な基礎的特性及び画期的応用可能性を明らかにすることに成功しているもので、電気電子工学上価値ある業績である。よって本論文は博士(工学)の学位に値するものと認める。

氏 名 Rohana Binti Sapawi
学位記番号 シ情 博甲第 497 号 (工学)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名 Development of
Low-Group-Delay-Variation CMOS
Power Amplifiers for UWB
Communication
(UWB 通信のための低群遅延ばらつき CMOS 電力増幅器の開発)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教 授 吉 田 啓 二
(副 査) " " 圓 福 敬 二
" " 准教授 金 谷 晴 一

論文内容の要旨

Wireless communication is ubiquitous in today's world. The advancement of wireless communication technology in the quest for better performance at lower cost, small sized, mass producible has resulted in increasing stringent demands on the integrated circuits (ICs) that constitute the building blocks of wireless systems.

In wireless communication there are many types of technique used in wireless transmission such as wireless local area network (WLAN), wireless personal area network (WPAN), ultra wideband (UWB), etc. UWB is relatively new technique, used wireless transmission that is capable of transmitting higher data rate over a wide frequency for short range with low power. UWB technology has become the most promising solution for future short-range and high-speed wireless data communication applications such as home server and cable less PC system. In 2002, the Federal Communication Commission (FCC) in United States officially released the regulation for UWB technology. FCC regulated the emission limits for the allocated 7.5 GHz band unlicensed use of commercial UWB communication devices. In addition to high data rate applications, UWB technologies also offer an extremely low cost alternative for many low data rate systems. Ever since the FCC allocated from 3.1 GHz to 10.6 GHz for UWB technology, interest has been renewed in both academic and industrial circles to exploit this vast spectrum for short range, high data rate wireless applications. The great potential of UWB lies in the fact that it can co-exist with already licensed spectrum users and can still pave the way for wide range of application.

The radio frequency (RF) power amplifier (PA) is an important component of any wireless transmitter. Their function is to amplify the signal and generate the required RF power that allows transmissions of the signal over the appropriate range. Power amplifier is most critical and power hungry block in UWB transmitter, its efficiency directly correlates to batters autonomy as well as the heat generated and thermals design problems. There is increasing demand for highly efficient RF power amplifiers to meet the ever-growing need for power saving, compact and low cost solutions. Moreover, emerging popular features such as video camera, games, the internet and TV are being progressively

added to new generation of wireless applications. However, they inevitably bring additional power consumption and burden the battery. High-efficiency power amplifiers are very important to save more power during transmit the signals.

In this thesis, Chapter 1 defines the introduction and the motivation, including the main objectives of this research. In Chapter 2, the overview of wireless standards is introduced. The PAs classes of operation which is linear PA is briefly described. Also, four main performance criteria of PAs are discussed. In this chapter, power amplifier for ultra-wideband system is introduced. Two main standards and the frequency allocation for UWB system are explained. The main specifications for UWB PAs such as frequency range, gain flatness and group delay are presented and the recently published CMOS UWB PAs are reviewed.

Chapter 3 details a proposed design of a low group delay variation power amplifier (PA) from 3.1 GHz to 10.6 GHz for ultra-wideband (UWB) applications. The proposed design employed employs a three-stage cascade common source topology that has a different design concept from other multi-stage topology to provide a broad bandwidth characteristic, gain flatness, and low group delay variation. The resistive shunt feedback technique at the first stage is implemented to achieve good input matching, which controls the upper frequency of the UWB system. The third stage realizes the gain at the lower corner frequency and the second stage is used to smooth the flatness of the gain curve. The measurement results show that the proposed design has high gain of 11.48 ± 0.6 dB from 3.1 to 10.6 GHz while maintaining a 3-dB bandwidth of 2.2 to 11.86 GHz. The input return loss (S_{11}) of -10~-26 dB and the output return loss (S_{22}) of -14~-22 dB, indicating a very broadband input and output matching characteristic, and the reverse isolation less than -42 dB, are achieved. Moreover, the proposed design has excellent group delay variation of ± 85.8 ps and has the smallest chip area so far compared to other works reported on the full band UWB PAs. Furthermore, good linearity and good power added efficiency of 15% are achieved across the entire band of interest. However, this PA design suffers from high power consumption of 100mW to achieve wide bandwidth and good linearity simultaneously.

In Chapter 4, presents a design of 3.1-6.0 GHz power amplifier (PA) 0.18 μ m CMOS technology for ultra-wideband (UWB) applications. The proposed PA design is for group 1 to group 2 of Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MB-OFDM) UWB applications. The UWB PA employs two stages amplifier and inter-stage circuit to provide a wider gain and gain flatness while shunt resistive

feedback technique is adopted at the input stage to provide wideband input matching. The proposed design is optimized for high and flat gain, good group delay variation and linearity at the same time hence, the inductive peaking technique and Class A PA are employed at the first stage and the second stage. The measurement results indicated that the proposed PA design has an average gain of 10 ± 1 dB, an input return loss (S_{11}) less than -6 dB, an output return loss (S_{22}) less than -7 dB, and group delay variation of ± 195.5 ps are obtained across the whole band. A good input 1dB compression point of -5 dBm and input third-order intercept point of 5 dBm at 5 GHz are achieved while consuming 30 mW power from 1.8 V supply voltage. With these characteristics the proposed design is suitable for Group 1-2 of MB-OFDM UWB transmitter.

In Chapter 5, presents the design, fabricate and test gain flatness and low group delay variation at the same time over the entire band of 0.9 to 4.8 GHz CMOS PA for UWB transmitters. This PA design employs a two-stage cascade common source topology, a resistive shunt feedback technique and inductive peaking to achieve high gain flatness, and good input matching. Minimization of group delay variation over a wide bandwidth of interest has been analyzed. Based on theoretical analysis, the main design factor for group delay variation is identified where high inductance at the input stage is the most useful to achieve minimum group delay variation. To maintain the gain flatness at the same time, the value of inductive peaking is optimized for desired gain flatness and low group delay variation. The measurement results indicate that the proposed PA design has an average gain of 10.2 ± 0.8 dB while maintaining a 3-dB bandwidth of 0.57 to 5.8 GHz, an input return loss $|S_{11}|$ less than -4.4 dB, and an output return loss $|S_{22}|$ less than -9.2 dB over the frequency range of interest. The input 1dB compression point at 2 GHz was -9 dBm while consumes 30 mW power from 1.5 V supply voltage. Moreover, excellent phase linearity (i.e., group delay variation) of ± 125 ps was achieved across the whole band. With these characteristics the proposed is suitable for UWB application.

Finally, Chapter 6 summarizes and concludes the work in this thesis, and discusses on possible future research based on this thesis.

論文調査の要旨

スマートフォンや携帯電話および、無線 LAN 等に代表される移動体通信機器の爆発的な普及により、いつでもどこでもブロードバンド通信が可能な環境を提供するユビキタスネットワーク社会が実現されている。ユビキタスネッ

トワーク社会の更なる高度化のためには、移動体通信機器の小型化、低消費電力化とともに新しい通信方式の開発が必要である。

近年 3-10 GHz 帯の微弱電波を通信に利用する UWB (Ultra Wide Band: 超広帯域) 無線と呼ばれる無線通信方式が注目されている。これは 2002 年米国の FCC (連邦通信委員会) により許可され、日本でも 2006 年より認可された新しい通信方式である。UWB 技術を用いれば、数 GHz にわたる非常に広い帯域の微弱電波を使用することで、ごく短い時間のパルス状の信号を実現することができるので、屋内において、ホームサーバと PC 等をケーブルで接続することなく、高いデータレートで通信することや、パルス波の照射による高精度測位システムなどへの応用が可能となる。UWB 無線システムに用いられる無線端末には、高周波動作・広帯域・高効率・低消費電力・低群遅延等の厳しい仕様が要求される。

UWB 無線端末のキーコンポーネントである RF フロントエンド LSI チップは、電力増幅器 (PA)、低雑音増幅器 (LNA)、ミキサ、発振器等の高周波アナログ回路、および ADC (アナログ-デジタル変換器)、DAC (デジタル-アナログ変換器) などのデジタル回路が混在するミクストシグナル LSI 回路より構成される。とりわけ高性能な UWB 通信システムを実現するためには特に、広い帯域において一定の利得を有し、波形歪を抑えるために群遅延特性の優れた PA の開発が不可欠である。本論文で著者は、群遅延特性に優れた UWB 用高性能 PA をミクストシグナル LSI に適した CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) LSI を用いて実現するための種々の新しい回路を提案している。更に高周波回路シミュレータを用いて回路設計を行い、ファウンドリにより試作したチップを計測・評価することにより高性能 PA の開発に成功している。

本論文では、0.9GHz-10.6GHz 帯の PA について、群遅延、電力利得、線形性などに関する研究成果について述べており、とりわけ以下の点で評価できる。

(1) スタガー構造を用いた、低群遅延ばらつき PA の新しい設計手法を開発し、3.1GHz-10.6GHz 帯 PA の試作および評価の結果、 $\pm 86\text{ps}$ 以下の世界最高クラスの低群遅延ばらつき特性を有する PA を実現している。

(2) MOS トランジスタの 3 次のトランスコンダクタンスを相殺することにより、線形性のすぐれた広帯域 PA の開発に成功した。線形性の評価値である 1dB コンプレッションポイントは 5.8dBm であり、世界最高水準を達成している。

(3) 抵抗を用いたシャント型フィードバック構造を導入した、広帯域利得特性を有する PA の作製・評価を行った。これらの PA は、いずれも性能指数 (Figure of Merit: FOM) において世界最高クラスの値を達成している。

以上要するに、本研究は、超広帯域無線通信システム実

現に不可欠な広帯域で低歪特性および利得平坦性を有する CMOSLSI を用いた電力増幅器の開発に成功したものであり、電気電子工学上価値ある業績である。よって本論文は博士 (工学) の学位に値するものと認める。

氏 名 長 野 正
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 498 号 (工学)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名 組込みシステム開発における品質課題と可視化に基づくアプローチに関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教 授 福田 晃
(副 査) " " 鷗林 尚靖
" " " 富浦 洋一

論文内容の要旨

組込みシステムの高性能化・高機能化に伴い、組込みソフトウェア開発が複雑化・肥大化している。同時に品質や安全性に対する関心が高まっている。本研究はこのような背景を前提として、組込みソフトウェアの品質を安定させ、開発全体の開発効率を向上させることを目的とする。組込みソフトウェアの品質を論じるには、問題の傾向や原因を明らかにしていくことが重要である。本研究では、可視化アプローチで検出した品質に関連する情報を分析し、組込みソフトウェアが抱える品質課題について以下の視点で考察を行ない、品質課題の改善に向けた手法や開発プロセスを提案する。

- ① 開発関連文書品質の定量化と可視化に基づく応用研究
- ② 実装コードの可視化に基づく協調設計プロセス
- ③ テスト期間中の不具合状況の可視化に基づく品質課題

本論文は、以下の 6 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景や位置づけと目的を示し、得られた研究成果について述べる。

第 2 章では、本論文に関連する研究について述べる。

開発関連文書品質の定量化と可視化に基づく応用研究では、開発文書の表現品質を分析する際に用いた表形式要約手法について述べる。

実装コードの可視化に基づく協調設計プロセスに関する関連研究では、筆者が提案する協調設計プロセスの構成に用いたリバースモデリング手法について述べる。

テスト期間中の不具合状況の可視化に基づく品質課題に関する関連研究では、不具合の成長モデルである習熟 S 字系モデルについて述べ、習熟度の必要性を示す。

第 3 章では、開発関連文書における文書表現の品質を定

量化し、その可視化に基づく応用研究を行う。本研究では、開発文書における情報伝達表現に着目し、新たな文書校正基準を定義した。また、これらの文書校正基準を取り入れた文書校正ツールを作成し、文書品質の定量化を実現した。

本研究は、日本語を母国語としないエンジニアに対する日本語の品質向上に応用し、文書校正ルールと辞書をカスタマイズすることにより校正箇所を 12% 増加させ、情報伝達の品質向上を確認した。

さらに、本手法を部門間の文書によるコミュニケーションの分析に応用した。本研究では、日本にある開発部門と日本のテスト拠点、あるいは、海外のテスト拠点との間のテスト報告書の授受に関するやり取りを分析し、情報伝達における品質課題を定量的に示した。その結果、不具合発生手順を確実に伝える文書フォーマットへの改善や部門間で授受されている開発文書に本文書校正ツールを事前適用することにより、最大で拠点間のコミュニケーションに存在する問題点の約 33% (国内拠点)、および、66% (海外拠点) の改善が期待できることが分かった。

第 4 章では、組込みシステムの品質向上を目的に、実装コードの振舞いの可視化に基づいた開発プロセスの改善について論じる。組込みソフトウェア開発においては、モデル駆動開発への移行が進んでいない。この現状を考慮し、過渡期の開発手法としてリバースモデリング手法を用いることにした。本研究では、リバースモデリング手法によって得られた現行システムのモデルを再利用し、新規ハードウェアやアーキテクチャに対応したモデルのシミュレーションを行う協調設計開発プロセスを提案した。

本協調設計プロセスの有効性については、デュアルプロセッサを搭載予定の複合機システムの性能設計に本協調設計開発プロセスを適用し、共同研究者と検証を行った。システムの性能予測について、リバースモデリング手法から得られた現行システム (シングルプロセッサ) のモデルを新アーキテクチャ (デュアルプロセッサ) 用のモデルに改良し、シミュレーションを実施した。一方、同アーキテクチャを FPGA (Field-Programmable Gate Array) ボードで実装し、実環境での性能測定を行い、シミュレーション結果と比較した。その結果、その差が 1.1% から 6.0% の間に収まっていたことが判明し、筆者が提案した実装コードの可視化に基づく協調設計プロセスのアプローチが上流工程での設計方針の検討に有効な方法であることを確認した。

第 5 章では、テスト期間中の不具合発生状況や品質状況の可視化に基づいて品質課題を特定し、プロジェクトを効果的に推進していくことについて論じる。不具合件数と残件数を予測する際に、不具合の残件数やエンジニアの習熟度を考慮する手法を示した。このアプローチによってプロジェクトの品質状況をより的確に把握し、早い段階でテストチームの要員追加や不具合修正チームに対する対応策

を実施できるようにした。しかし、不具合件数が減少しても解決に時間を要する不具合によって品質が安定しないことがあり、新たに不具合生存期間を示す指標を提案し、不具合生存期間の可視化を行った。不具合件数という量的な分析だけではなく、不具合の質的な分析が進み、その原因を開発部門にタイムリーにフィードバックできるようになった。その結果、対象としたプロジェクトでは、前機種の開発と比べてソースコードは約 2 倍、機能数は約 3 倍、テストシナリオも約 3 倍にもかかわらず、予定されていた開発期間を約 30% 削減した。また、出荷の直前での重要問題が減少したことを確認した。

第 6 章では、これまでの研究をまとめ、今後の課題と展望について述べる。

論文調査の要旨

各種の機械や機器に組み込まれて、その制御を行うコンピュータシステムである組込みシステムは、オフィスオートメーション、工業制御システム、通信機器、運輸システム、娯楽機器など多くの産業/日常生活に浸透しており、重要な研究対象となっている。

近年、組込みシステムの高機能化に伴い、当該システムに組み込まれているソフトウェア (組込みソフトウェア) の占める割合が増大するとともに、大規模化・複雑化しており、組込みソフトウェアの品質の向上が緊急の課題となっている。さらに、組込みソフトウェアは、我が国を含んだ多国間で開発されることが多く、多国間での効率的な開発が重要となっている。

本論文は、以上を背景にして、組込みシステム開発におけるソフトウェアの品質を向上させる際の課題を洗い出し、その解決策として、可視化に基づくアプローチを提案し、提案手法を企業の実現場で評価することにより、提案手法の有効性を実証したもので、以下の点で評価できる。

第一に、著者は、組込みソフトウェアの開発工程における不具合を企業内で調査し、開発文書に関する不具合が全不具合の 65% を占め、さらにそれらの不具合の中で、文章表現に関する不具合が 24% を占めていることを指摘している。さらに、本指摘を基に、文書表現に関する不具合 16% ($=0.65 \times 0.24$) に着眼し、可視化による文書表現の改善を試みている。具体的には、要求仕様書の構成に関する IEEE 規約である IEEE Std. 830 を参考にして、非曖昧性などの 4 種類の文書校正基準に着眼して、詳細な校正項目 (校正ルール数: 約 1 千) を定義している。さらに、本校正項目を既存の文章校正ツールに取り込み、企業内で開発している多機能複写機ソフトウェア開発関連文書 (5 つの文書、計: 1 万単語程度) に適用し、本ツールの性能を評価した。その結果、目視による検出と比べて、本ツールは校正項目の検出漏れを防ぎ、さらに、検出時間を目視に比べて大幅に削減でき (目視の場合: 480 分、本ツールを用いた場合:

8 分程度), 本校正項目を取込んだツールは効果があることを示している. これにより, 本校正基準と校正項目の有効性を示し, 組込みソフトウェア開発関連文書の品質改善に有効な手段を与えている.

第二に, 著者は, 本文書校正ツールを, 日本語を母語としない技術者 (外国人技術者) が作成した日本語文書に適用するとともに可視化し, その有効性を示している. 具体的には, まず, 企業内で当該技術者が作成した 20 種類の開発関連文書を調査し, 外国人技術者 (本調査ではある 1 つの国) 特有の表現に関連する校正ルールを約 100 件, 当該技術者が使用する特有の用語約 70 個を洗い出している. さらに, これらを本ツールに取り込み, 上記の調査対象の 20 種類の文書とは異なる 75 種類の文書に本ツールを適用している. その結果, 検出数がカスタマイズ以前では 800 件であったのに対し, カスタマイズ後では約 900 件となり, 校正箇所を約 12%増加させ, 外国人技術者の開発文書の品質向上に効果があることを示している. これにより, 本手法を調査対象以外の国にも展開できる可能性を示唆し, 多国間での分散開発に有効な手段を与えている.

第三に, 著者は, 組込みソフトウェアのテスト開発を改善する手法を提案するとともに, 提案手法を可視化し, その有効性を実証している. 具体的には, 従来は, 不具合の発生件数の時間的推移のみに着眼していたものを, 件数のみではなく, 不具合が残る「不具合生存期間」という新たな尺度を提案し, 本提案尺度を高機能複写機の開発プロジェクトに適用している. その結果, 当該尺度を導入せず, 前機種の開発経験から見積もれる従来の開発体制 (不具合の発生件数のみを考慮した体制) を適用して得られた本機種の開発期間と比べて, 本尺度の適用により, スキルの高い技術者を投入するなどの改善を施した開発体制では, 開発期間を約 30%削減できたことを実証している. これにより, テスト開発に関して新たな知見を与えている.

以上, 本論文は, 組込みソフトウェアの品質を向上させる目的で, ソフトウェア開発文書の品質改善およびテスト開発に関する可視化に基づく新たな手法を提案するとともに, 提案手法を実際に企業の開発現場に適用することにより, 本提案手法の有効性を実証したものであり, 情報工学上寄与するところ大きい. よって, 本論文は, 博士 (工学) の学位に値すると認める.

システムのためのソフトウェアプロ
ダクトラインエンジニアリング)

論文調査委員

(主 査)	九州大学	教 授	福田 晃
(副 査)	〃	〃	鵜林 尚靖
〃	〃	〃	古川 浩
〃	〃	准教授	岡安 崇史

論 文 内 容 の 要 旨

In the agriculture area, the wireless sensor network (WSN) plays an important role in supporting farmer's requirements and agricultural tasks to make improvements in productivity and sustainable agriculture. It provides a more accurate and reliable monitoring system for agriculture and allows for significant simplification in wiring and contributes to the reduction of maintenance complexity and costs. However, the agricultural wireless sensor network incorporates many variables such as different crops, different environments, technologies, economics, and cultures. These variables introduce significant efforts of configuring the system for each site, making modifications, and producing extensions of the system. Hence, the wireless sensor network system for agriculture becomes a complicated and large-scale software intensive system. This thesis focuses on ways to reduce the numerous efforts and provides comprehensive mechanisms based on software product line (SPL) engineering to efficiently develop various agricultural wireless sensor network systems to be deployed in different fields with different crops, technologies, economics, cultures, and communities.

We first study commonality and variability management of agricultural wireless sensor network systems. We perform logical level feature modeling for commonality and variability analysis of agriculture applications executed on the entire wireless sensor network architecture as well as physical level feature modeling for commonality and variability analysis of the component of the sensor network architecture. We present the example feature models of the sensor network-based agriculture system family. Our proposed two-layered feature modeling contributes to showing a comprehensive view of current and future wireless sensor network-based agriculture systems and helps the agriculture domain experts and software engineers to communicate intuitively. The feature model will be useful for the pre-design of the software and the reusable components shared by the systems.

After managing and visualizing the commonality and

氏 名 Mohammad Fajar
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 499 号 (工学)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学 位 論 文 題 名 Software Product Line Engineering for
Agricultural Wireless Sensor Network
Systems
(農業向け無線センサーネットワーク

variability of the system family, the second study we propose is a decision-making framework with integer linear programming (ILP) to optimize feature selection. Inclusion or exclusion of each function in each variant system is represented by the binary variable. The farmer's requirements and system constraints are reflected by the assigning of 0-1 to the variables. Constraints on selecting functions in each variant system as well as quality attributes of the system are represented by linear functions of the variables, which finally become the objective function and constraints of integer linear programming. The integer linear programming gives the best configuration for the system to be derived from the core assets while satisfying the constraints. The proposed decision-making framework was applied to the case study of the sensor network system family for field monitoring. In the case study, we obtained an optimal configuration within the specified cost and power consumption to satisfy the farmer's requirements in developing a field monitoring application. The proposed framework will be able to be used to prepare the best configurations for a new application or to optimize an existing configuration for maintenance purposes. Once an optimal configuration has been obtained, then we use it as a basis to design an application model for domain-specific modeling to automatically produce a final application.

After optimizing the configuration, the third study in our proposed software product line engineering is to produce final applications or products of the agricultural wireless sensor network system family with the automation mechanism. This work provides the automation mechanism using the domain-specific modeling (DSM) approach. In the proposed domain-specific modeling, we propose two-layered abstraction models to increase the level of abstraction in developing the agricultural sensor network applications. The first level is the logical level abstraction to define the logical aspects of sensor network applications; the second level is the physical level abstraction to specify the physical components of the applications and to form its network architecture. Both of the layers are linked with task allocation mapping. The task allocation mapping provides an easy and flexible way to distribute application tasks into sensor nodes and control the behavior of the sensor nodes or a group of nodes. The results of the evaluation of the case study indicate that the use of proposed domain-specific modeling language and its generator for automating mechanism is capable of increasing productivity in the development time by about six to seven times that of the manual approach. The evaluation of the quality of the generated codes in the simulation

environment shows the effectiveness of processing the tasks in the case study; average calculation at intermediate nodes could significantly reduce the cost of communication. In this evaluation, the generated applications also have been run successfully in the MICAz platform and collected environmental data. In addition, to fulfill the software maintenance requirements on sensor nodes, the proposed domain-specific model also provides reconfiguration mechanisms for managing and updating software codes in agricultural wireless sensor network applications. The evaluation results indicate that the use of the proposed domain-specific modeling is capable of increasing productivity in development time by about four to five times over the handwriting approach. The evaluation of the quality of the generated codes in the simulated environment shows the re-configuration process for environmental sensing applications could be performed successfully without significantly decreasing the network performance.

The three important aspects of software product line engineering that we present for agricultural wireless sensor network systems in this thesis become our proposed solution to reduce the numerous efforts on extension and modification as well as configurations and the proposed work is expected as a comprehensive method to establish mass customization for wireless sensor network development in the area of agriculture.

論文調査の要旨

情報通信技術は、あらゆる分野の基盤技術となっている。この中で、農業に IT 技術を導入する（農業の IT 化）試みが行われている。農業の IT 化には、農作物が作られている土地の温度、湿度などの気候状況の把握、農作物の生育状況などをセンシングすることが重要となっている。センシングノードをネットワークで有機的に連結させたセンサーネットワークは、導入コストの面から、有線ではなく無線で連結することが一般的となっている。この農業向け無線センサーネットワークシステムには、下記の課題がある。

- 1) 農作物にも茶、いちご、穀物など、多様な種類があり、また、気候状況を含んだ農作物を作る土地事情及び農業従事者の要求などに関して多様性があり、この多様性を含んだ無線センサーネットワークを如何に戦略的に体系化して開発するか、その戦略的方法論の確立が重要となっている。
 - 2) 上記の無線センサーネットワークシステムのソフトウェアを如何に迅速に構築するか、すなわち、ソフトウェア構築技術の確立が重要となっている。
- 本論文は、以上の課題を解決すべく、システムの戦略的

開発方法論であるソフトウェアプロダクトライン開発方法論 (SPL) を農業に適用した方法論を提案するとともに、無線センサーネットワークシステムのソフトウェアを迅速に開発できる手法を提案し、シミュレーションにより評価し、提案手法の有効性を示したものであり、下記の点で評価できる。

第一に、著者は、農業向け無線センサーネットワークの SPL を提案している。具体的には、SPL を農業向けセンサーネットワークシステムに適用するとともに、農業におけるセンサーネットワークの特徴 (フィーチャ) を明らかにし、既存の SPL のフィーチャモデリングに適用し、農業向けセンサーネットワークの戦略的／体系的開発方法論を提案している。これにより、農業の IT 化に向けた無線センサーネットワーク開発方法論に新たな知見を与えている。

第二に、著者は、上記の SPL のフィーチャモデリングにおいて、実際に開発するセンサーネットワークソフトウェアの開発方法論を数学的に定式化している。具体的には、フィーチャモデリングに線形計画法を適用する新たな方法論を提案し、いくつかを例示している。これにより、SPL の展開可能性に関する知見を与えている。

第三に、著者は、無線センサーネットワークに特化したドメイン特化型言語 (DSL : Domain Specific Language) を設計／開発し、その有効性を示している。具体的には、無線センサーネットワークに関して、図的表現を用いて設計するとともに、実装している。さらに、提案手法を、シミュレーションにより評価している。その結果、人手によるコーディングと比較して本提案手法は、開発期間を約 1/6 に短縮できたことを明らかにしている。また、本 DSL の性能に関しては、ノード間通信時間などを評価し、実用に耐えうることを示している。これにより、無線センサーネットワークのソフトウェア開発に DSL が有効であることを実証し、新たな知見を与えている。

以上、本論文は、農業の IT 化を促進する目的で、農業向け無線センサーネットワークのためのソフトウェアに関して、戦略的／体系的開発手法を提案し、当該ソフトウェアの迅速な開発を促進できる DSL を設計、実装し、シミュレーションにより本提案手法の有効性を示したものであり、情報工学上寄与するところが大きい。よって、本論文は、博士 (工学) の学位に値すると認める。

(屋内位置測位における基地局の設置及びチャネル割当に関する研究)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教 授 福田 晃
(副 査) " " 長谷川 隆三
 " " " 古川 浩

論文内容の要旨

Deployment problem and channel assignment problem are crucial issues for improving the network capacity of WLAN. On the other hand, as the development of WLAN, researches on positioning approaches as well as positioning precision by using WLAN as infrastructure devices for indoor positioning have also been proposed. Both of these two WLAN-related research directions (i.e., on deployment and channel assignment without consideration about positioning) have been extensively for a long period. However, we are the first, to the best of our knowledge, to consider these two research directions with the restriction of indoor positioning. That is, to consider deployment problem and channel assignment problem in an indoor positioning system with WLAN. Note that in our work, a basic requirement is that terminals must be able to observe three base stations in each positioning point, since we use multilateration (trilateration) as the positioning method in our work.

In conventional communication area, deployment problem denotes how to place base stations (namely Access Points) to achieve the maximum coverage or to cover a target area with the least number of base stations. In addition to this, the requirement of positioning accuracy is also considered in our work. That is, our work is about how to use the least number of base stations to cover a target area and every positioning point in the target area can meet a satisfied accuracy value for positioning. Since the deployment problem is a NP hard, we propose rapid algorithms to solve our problem. In particular,

1. An indicator called Dilution Of Precision (DOP) is introduced to evaluate the geometry relation between AP deployment and positioning precision.
2. We construct a relationship between AP Deployment Possible Points (APDPPs: the points to which APs can be deployed) and positioning points.
3. The relationship is simplified by Boolean algebra for mitigating the number of the relationships.
4. Based on the above work, our proposals (Directly Enumerate Method and Division Method) are to find out the least number of APDPPs and to deploy them.

According to our simulation results, our proposals are

氏 名 李 明
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 500 号 (工学)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名 A Study on Deployment and Channel
Assignment Problem for Access Points
in Indoor Positioning Systems

with shortened computational time compared with conventional method of Original Combination Algorithm (OCA).

Channel assignment is originally used to mitigate the interference among APs. In our work, after deploying base stations (as described above), to improve the network capacity (throughput) of WLAN, channel assignment schemes are considered in indoor positioning system. The throughput estimated method in our work is based on the mechanism of CSMA/CA with RTS/CTS. The objective function of our methods is to achieve the maximum throughput.

To cope with different wireless environments, we propose static channel assignment schemes and a dynamic channel assignment scheme, respectively, as follows.

1. Static channel assignment schemes can be used for relatively stable WLAN environments, such as offices. Furthermore, we discuss the static channel assignment schemes for two types of WLAN: infrastructure mode and mesh network mode.

A static channel assignment scheme in the infrastructure mode.

We first analysis four types of potential restrainers in the infrastructure mode to calculate the throughput based on CSMA/CA with RTS/CTS, and then propose an optimized channel assignment method with a maximized overall network throughput which must satisfy the requirements of both positioning and communication.

A static channel assignment scheme in the mesh network mode.

Due to the character of the mesh network, we consider mesh routing and add three types of potential restrainers in addition to the four types in the infrastructure mode above. This work also considers the requirements of positioning and communication simultaneously.

2. A dynamic channel assignment scheme is proposed for dynamically changing WLAN environments, such as airports.

We discuss a dynamic channel assignment scheme in the infrastructure mode. However, the difference of this work with static schemes is that we use location information of terminals as a feedback, to dynamically assign channels to APs and thus to mitigate interference. In the inspect of positioning, the estimate accuracy can also be improved by assigning different channels to APs due to that mobile terminals can receive more accuracy signal strength from APs of different channels.

We evaluate the throughput of the three channel assignment schemes by simulation. To verify the effectiveness of our proposals, we compare them with some

conventional methods (the Signal Method, the Random Method, and the Least Congested Channel Search Method). The results illustrate that the throughput of our proposals are higher than any other methods mentioned.

We believe our work can be utilized to reduce the number of base stations (with respect to cost) and to mitigate the interference of base stations (with respect to improvement of the network capacity of WLAN) in the primary design phrase of indoor positioning systems by WLAN.

論文調査の要旨

スマートフォンなどに代表されるように、現在、モバイル端末機器が日常生活に浸透している。これらのモバイル端末機器は、当該機器をノード（モバイルノードと呼ぶ）として、基地局（アクセスポイント：AP）と無線を介して有機的に連結されてネットワークを形成している。当該無線ネットワークにおいては、GPS が活用できない屋内において、サービス向上のためモバイルノードの位置測位を行う必要があり、また、位置測位とスループットの向上が重要となっている。これらを背景にして、下記の課題を解決することが緊急の課題となっている。

1) 時々刻々場所が変化するモバイルノードの位置の測位精度を高く保持しつつ、AP の導入コストを削減する目的で、AP 設置台数を極力少なくするためには AP をどこに設置したらよいか？

2) 当該無線ネットワークにおいて、ネットワークのスループットの向上と、モバイルノードの位置測位精度の向上を同時に満たすようにするためには、どのように AP にチャネルを割当てればよいか？

本論文は、以上の課題に対して、解決方法を提案し、シミュレーションにより提案手法の有効性を示している。具体的には、上記課題 1) に対しては、実社会の現状を反映した問題を設定し、新たな問題の定式化を行っている。さらに、上記課題 2) に対しては、モバイルノードの位置測位と無線ネットワークのスループットの双方を同時に取り扱う新たな問題を設定し、解決手法を提案し、シミュレーションにより提案手法の有効性を示したものであり、以下の点で評価できる。

第一に、著者は、屋内位置測位において、実社会の事情に適した AP の配置問題を提案し、提案問題を定式化している。具体的には、実社会では、屋内事情のため、予め AP 設置可能場所（AP 設置可能点）が決められていることが多い。そこで、著者は、予め複数の AP 設置可能点が与えられているという条件の下で、それらの中から、実際に AP を設置する点（AP 設置点）を求める問題を提案するとともに、問題の定式化を行っている。定式化では、従来、AP 設置可能点に着眼していたものを、本論文ではモバイルノード

ドの観測点に着眼し、この着眼点により、問題の定式化を容易にしている。さらに、当問題をブール代数を用いて定式化するという、従来にない定式化を提案している。さらに、いくつかの数値例により、AP 設置点を具体的に求めている。これにより、AP の配置問題に新たな知見を与えている。

第二に、著者は、AP のチャネル割当てに関して、モバイルノードの位置測位とスループットのトレードオフを指摘し、位置測位とスループットを適切に解決する新たな課題を指摘し、当該課題を解決する手法を提案するとともに、シミュレーションにより提案手法の有効性を示している。具体的には、モバイルノードの位置測位を効率よく行うためには、モバイルノードと通信できる複数の AP との間には、同一チャネルを割当てた方がよい。一方で、同一チャネルを割当てるとスループットが低下する。そこで、本論文では、本トレードオフの問題を定式化している。さらに本問題の解決手法を提案し、シミュレーションにより評価している。その結果、モバイルノードと通信できる複数の AP に同一チャネルの割当てを維持しつつ、チャネル割当てをランダムに行った場合に比べて、スループットを約 1.3 倍に向上できることを示し、本提案手法の有効性を示している。これにより、従来個別に扱われてきた位置測位とスループットの問題に新たな知見を与えた。

第三に、著者は、上記では、チャネル割当ては静的であったものを、モバイルノードの移動を考慮した、AP への割当てチャネルを動的に行う問題に拡張し、動的チャネル割当て手法を提案している。さらに、提案手法をシミュレーションにより評価し、静的割当てに比べて、スループットが高くなることを示し、本手法の有効性を示している。これにより、AP チャネルの動的割当て問題に新たな知見を与えている。

以上、本論文は、無線ネットワークを構築する屋内事情を考慮した AP 設置問題を設定し、当該問題の新たな定式化手法を提案するとともに、AP のチャネル割当てに関して、モバイルノードの位置測位とスループット向上の双方を同時に扱った新たな問題を解く手法を提案し、シミュレーションによる評価により、提案手法の有効性を示したもので、情報工学上寄与するところが大きい。よって、本論文は、博士（工学）の学位に値すると認める。

(主 査) 九州大学 教 授 安浦 寛人
(副 査) " " 福田 晃
 " " " 村上 和彰

論文内容の要旨

昨今の半導体微細加工技術の進歩により、数十メガゲート規模のデジタル回路を搭載した LSI(Large Scale Integration)が一般消費者向け製品にまで使用されるようになってきている。この進歩により、従来は複数の半導体チップで構成されていたシステムを 1 つのチップに集約する SoC(System on a chip)が、特に携帯機器の分野で主流となっている。バッテリー駆動時間延長のため携帯機器向け SoC は消費エネルギーを抑えることが強く求められ、従来の SoC 開発は低消費電力化を半導体微細加工プロセス技術の進歩に頼ってきたが、微細化が進むにつれリーク電流による消費電力が顕著になり、SoC 開発はプロセス技術の進歩から脱却した性能向上を模索せざるをえない転換期を迎えている。その解として、我々はマルチコアプロセッサを採用した。マルチコアプロセッサを採用するにあたり設計コスト削減の観点からコア数に依存せず SW 実行可能なパイナリコンパチビリティ、コア数に比例して性能向上する性能のスケラビリティ、コア数を減らすことで消費エネルギーを比例して小さくできる消費エネルギーのスケラビリティ、コア数が増減しても安定して動作し続ける信頼性のスケラビリティに着目し、マイクロアーキテクチャに SMP (Symmetric Multiple Processor)、カーネルに細粒度スレッドモデルを実現した。

このアーキテクチャ上で性能のスケラビリティをより高めるために、階層キャッシュの利用効率を考慮した細粒度スレッドスケジューリング手法を提案する。本手法はアプリケーション開発者がスレッドのコア割り当てを局所化するようスケジューラに指示する API と、指示された情報に基づいてスケジューリングを最適化するためのアルゴリズムで構成されている。本手法を FCFS(first-come first-served)手法と H.264 デコード処理をベンチマークに用いて比較した結果、最大で約 50%の性能向上を確認した。

消費エネルギーのスケラビリティをより高めるために、動作中の各プログラムが性能状況を自己申告してプロファイリングをとり、スケジューラがプログラムごとにコアを割り当てる時間配分を調整し、全プログラムが性能を満たす最小のコア数を算出してコアの電源 ON/OFF を動的に制御するフレームワークを提案する。実験では電源制御しない場合と比較して最大で約 53%の消費エネルギーを削減できることを確認した。

信頼性のスケラビリティをより高めるために、既存のデータレース検出アルゴリズム“happens-before”を改良し、トレードオフ関係にある検出率とメモリ使用量をハンドリング可能とするアルゴリズムを提案する。

氏 名 森 達 矢
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 501 号 (工学)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名 組込みメディア処理向け対称型マルチコアプロセッサにおける細粒度スレッドを利用した処理手法の研究
論文調査委員

“happens-before”はスレッド数 N に対してメモリ使用量が $O(N^2)$ であるが本アルゴリズムでは、検出率の低下を許容すればメモリ使用量を $O(N)$ に下げられる。また、本アルゴリズムを応用することでメモリ使用量を抑えつつ検出率を高める手法を合わせて提案する。実験では、検出率ほぼ 100%で 1 回のデータレース検出におけるメモリ使用量を 10 分の 1 以下に削減できることを確認した。

論文調査の要旨

情報通信機器は、文字情報、音声情報、画像情報、各種センサーデータなどを取り扱い、無線を含む種々の通信回線による高速通信機能と高度の演算処理機能および大規模な記憶機能を持つ極めて高機能な機器として、広く社会に普及している。その高機能化、小型化、軽量化、低消費電力化の原動力となっているのが、高機能で複雑なシステムを 1 つのチップに集積する SoC (System on a chip) 技術である。特に、バッテリー駆動時間を伸ばすために携帯情報通信機器向けの組み込みシステム用 SoC は、その消費エネルギーを抑えることを強く求められ、従来の半導体微細加工プロセス技術の進歩のみに頼らないシステムアーキテクチャやソフトウェアレベルでの技術革新が強く求められている。近年、広く採用されるようになった複数のコアプロセッサを内蔵するマルチコアプロセッサ方式は、このような新しい SoC 技術の中核を成すものである。

本論文では、対称型マルチコアプロセッサ (SMP) 方式において、コア数に依存せず同じソフトウェアが実行可能なバイナリコンパチビリティを維持しつつ、1) コア数に比例して性能向上する性能のスケラビリティ、2) コア数が増減しても安定して動作し続ける信頼性のスケラビリティ、3) コア数を減らすことで消費エネルギーを比例して小さくできる消費エネルギーのスケラビリティを実現するための技術を開発し、その有効性を実験的に検証するとともに、商用の SoC の開発に適用した実用的な研究である。

第一に、性能のスケラビリティを高めるために、著者は階層キャッシュの利用効率を考慮した細粒度スレッドスケジューリング手法を提案している。アプリケーションプログラムの開発者がスレッドのコア割り当てを局所化するようスケジューラに指示するインターフェース機構と、指示された情報に基づいてスケジューリングを最適化するためのアルゴリズムを提案している。画像処理の典型的な例である H.264 デコード処理をベンチマークに用いて、提案手法を従来手法と比較した結果、最大で約 50%の性能向上を確認している。これにより本提案の手法の有効性が実証的に示され、一部機能を変更して実製品にも採用されており、学術面だけでなく産業的にも高く評価できる。

第二に、信頼性のスケラビリティを高めるために、システムの開発段階用いられるデータレース検出アルゴリズムである happens-before を改良し、検出率とメモリ使

用量のトレードオフを制御できるアルゴリズムを提案している。既存アルゴリズムがスレッド数 N に対して $O(N^2)$ のメモリを使用するのにに対し、提案アルゴリズムでは、若干の検出率の低下を許容すればメモリ使用量を $O(N)$ に下げられることを示している。さらに、提案アルゴリズムを応用することでメモリ使用量を抑えつつ検出率を高める手法も合わせて提案している。実験では、検出率ほぼ 100%で 1 回のデータレース検出におけるメモリ使用量を 10 分の 1 以下に削減できることを示している。本アルゴリズムは、開発現場での有用性が認められ、実際の SoC の開発環境に取り入れられて製品開発段階で成果を挙げており、学術面および産業面の両面から評価できる。

第三に、著者は、消費エネルギーのスケラビリティを高めるために、利用者によるシステムの使用中に、走行している各プログラムが性能状況を自己申告して、スケジューラがコアを割り当てる時間配分を調整し、全プログラムが性能を満たす最小のコア数を算出してコア単位で電源の ON/OFF を動的に制御するフレームワークを提案している。実験では電源制御しない場合と比較して最大で約 53%の消費エネルギーを削減できることを確認している。この結果、本提案のシステム使用時における省エネルギー効果が検証され、一部機能は実製品において実用されており、工学的な成果として評価できる。

以上を要約すると、本研究は、マルチコアプロセッサシステムにおける性能のスケラビリティを高めるための細粒度スレッドスケジューリング手法、信頼性のスケラビリティを高めるためのデータレース検出アルゴリズム、消費エネルギーのスケラビリティを高めるための電源の ON/OFF を動的に制御するフレームワークを提案し、その有効性と実用性を示したもので、情報工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文に値すると認める。

氏 名 溝 口 誠一郎
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 502 号 (工学)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学位論文題名 Study on Traffic Analysis for Network Incident Handling
(ネットワークインシデント対応のためのトラフィック分析に関する研究)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 准教授 堀 良彰
(副 査) " 教 授 竹内 純一
" " " 岡村 耕二

論文内容の要旨

There are a lot of threats in the Internet, such as

network scanning, distributed denial of service attacks, and malicious software infections. Such activities target the Internet users and services in order to obtain benefits from the attacks. Furthermore there is a platform called a botnet and adversaries launch these malicious activities by constructing botnets. To monitor, analyze and avoid these network incidents performed by botnets, many researchers have developed network traffic analysis techniques.

One of the studies of network traffic analysis for network incidents is darknet monitoring. A darknet is a collection of routed and allocated IP addresses where no legitimate host or service exist but can be reached from the Internet. Since network scanning packets from botnets sometimes reach the darknet, information obtained from darknet monitoring can be used to grasp botnet activities. It is important to spread such darknet sensors for better network incident handling. So far, a darknet monitoring is conducted on the network that is not used for real operation, and researchers discuss about the characteristics of data collected from such monitoring environments. Generally, since it is difficult for organizations to prepare address blocks for monitoring, darknet monitoring scheme on production networks is needed. However there is no research that conducts darknet monitoring on real operated networks and analyzes the data obtained from the monitoring. In this dissertation, we conduct a darknet monitoring on real operated networks with blackhole sensors and active responders and analyze obtained darknet traffic. We show several darknet traffic analysis and show new characteristics of darknet traffic that cannot be obtained with the existing schemes.

Next we study another technique for analyzing network incidents. In order to grasp more detailed information about network incidents, a honeypot analysis is useful. A honeypot is a decoy of computer which is expected to be attacked, intruded, and compromised by adversaries. By placing a lot of decoys on networks, we can catch attacks toward the networks and obtain useful information for those incidents. So far several researchers have proposed honeypot placement scheme on production networks. They try to assign as many unassigned IP addresses on their networks as possible to get much information about network incidents. However there is a drawback in their IP address assignment scheme for deploying honeypots when they implement honeypots on production networks which have high dynamicity. To handle this drawback, we proposed a new method which assigns free IP addresses by collaborating with DHCP services on the network. This method enables unassigned IP addresses which exist separately in the network to be monitored. We

show the design of the proposed IP address assignment scheme and discuss about the parameters to be influenced its monitoring ability.

Last we study about a bot detection technique by monitoring network traffic. To avoid network incidents, detecting and disabling botnet is important. Since the development skills of malicious software developer improve, the existing schemes have less effectiveness. In this dissertation, we propose a new approach for bot detection by analyzing the characteristics of network communications. This approach focuses on the difference between humans' behaviors and machines' one such as bots. Since bots are pre-programmed software and they have regularity in their communications, while those of humans have randomness. We show the difference of these characteristics and propose a clustering-based method which quantitatively evaluates the regularity in communications of network applications. Then we design bot detection systems and evaluate them with real network traces of human IRC communications and those of IRC bots. We prepare 35 IRC bot samples and 30 human IRC samples and evaluate our proposed scheme with these samples. As a result, all IRC bot samples are detected as bots correctly with very low false positives.

論文調査の要旨

広域ネットワーク化された多数の計算機から構成される情報基盤であるインターネットにおいて、脆弱性を有する計算機に仕込まれる悪意あるソフトウェアであるマルウェアによる被害は年々深刻になっている。中でも、ボット群と遠隔制御網からなるボットネットは、脆弱なホストを探索するネットワークスキャン、マルウェアの拡散、大量のパケット送信によりサーバの機能停止をもたらす分散サービス不能攻撃等の脅威の温床であり、ボットネットの検知とその脅威への対策は重要な課題である。

このようなネットワークインシデントの対策のためには、まずその実態を把握するための観測体制と分析技術が重要である。本論文では、ネットワークトラフィック観測技術ならびに、特にボットネット検知を目的としたトラフィック分析技術に関する3つの課題に取り組んだ。

第1に、未割当のIPアドレス空間に到達する不正パケットの観測網ダークネットにおける観測データの特徴を新たな視点から分析した。ダークネットは連続した未割当IPアドレスを用いて構成されている空間を指し、不正パケットしか観測されない空間であるため、スキャン行動等のマルウェアによるトラフィックを観測するために用いられている。これに対し著者は、実運用に供されているネットワーク内に点在する未割当IPアドレスを用いて、通常のダークネットと同様に不正パケットのみを観測する手

法を考案した。本手法による観測データを、通常のダークネットによる観測データと比較した結果、従来構成によるダークネットで観測される攻撃トラフィックには見られなかったポートスキャンをはじめ、ウェブサーバやセキュアシェルサービスへの攻撃等のネットワークインシデントの観測結果が得られることを明らかにしている。これらの知見は、今後さらに多様化していくであろう脅威への対策として、観測網の拡張が有用であることを示している。

第2に、ハニーポットと呼ばれるおとりネットワーク端末を、実運用に供されているネットワーク中に動的に挿入する機構を考案した。従来、ハニーポットは IP アドレスを静的に割当て構築されおり、各組織におけるネットワーク運用上、連続している IP アドレスを定常的に割当てすることは困難であった。著者が考案した方法は、実運用ネットワークの一部として点在する未割り当て IP アドレスを、動的アドレス割当て機構である DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) サービスとの連携によって管理し、ハニーポットに動的に割当てする手法である。本手法により、従来の静的アドレス割当てでは対応できない、接続ホスト数が動的に変化するようなネットワークにおいても、ハニーポットを動的に挿入することで観測点を増やし、より多くの攻撃トラフィックを観測できるシステムを新たに設計した。著者はさらに、キャンパスネットワークにおける DHCP による動的割当て挙動を例に、考案した攻撃トラフィック観測システムを運用する際、動的アドレス数の決定にかかるパラメータに関する設定の指針を与えた。これらの成果は、より広大なダークネット観測網を構築するための工学的知見を与えており評価できる。

第3に、ボットに感染したホストをそれが送出するメッセージの送出間隔の解析により検知する手法を考案した。従来、ホストが送信するメッセージ内容の精査や、そのサイズに着目した手法が提案されていたが、攻撃者が行い得る暗号化やパディング等の回避策に対しては脆弱であった。著者は、検査対象ホストのメッセージ送出間隔の特徴から、その通信を行なっている主体が人間による操作であるか、プログラムによる機械的な操作であるかを判定することにより、ボットを検知する手法を考案した。本手法は、人間による操作に起因するメッセージ送出間隔が指数分布に従うという経験的事実を利用し、クラスタリング分析によって機械による操作との区別を行うものである。その際、機械によるメッセージ送出間隔をヒストグラムによりモデル化した。実運用ネットワークにおいて観測された IRC (Internet Relay Chat) プロトコルを制御チャネルに使う IRC ボットのトラフィックと、人間の操作による IRC アプリケーションの通信を用いて評価し、誤検知率を 3.4% 以下に抑えながら、100%の再現率を達成しており、これらの成果はインターネットにおける攻撃対策のためのシステム構築に資する工学的貢献として評価できる。

以上要するに、本論文は、ネットワークトラフィック観測技術ならびに、特にボットネット検知を目的としたトラフィック分析技術における新たな手法を提案するとともに、提案手法を実トラフィックに適用することにより、本提案手法の有効性を実証したものであり、情報工学上寄与するところが大きい。よって本論文は、博士（工学）の学位論文に値すると認める。

氏 名 塩 原 敬
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 503 号 (工学)
学位授与の日付 平成 25 年 3 月 26 日
学 位 論 文 題 名 長尺高温超伝導テープ線材における
面内臨界電流密度分布の高速評価シ
ステムに関する開発研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教 授 木須 隆暢
(副 査) " " 圓福 敬二
 " " " 岩熊 成卓

論 文 内 容 の 要 旨

超伝導材料では、臨界温度以下に冷却された際に直流電気抵抗が零となり、損失をほとんど無視できる状態で大電流密度での通電が可能となる。この特性を活かし磁気共鳴画像診断装置や磁気浮上式鉄道といった先進技術を支える様々な応用機器研究開発が進められている。最近では特に、省エネルギー化、CO₂排出削減に大きく貢献できる技術として、電力機器や産業機器、さらには先進医療機器への応用が期待されている。超伝導線材の機器応用に際しては、km 級の長尺線材が必要となるが、特に局所欠陥等に起因する超伝導特性の局所不均一性は、機器用導体の性能ならびに信頼性を著しく劣化させる原因として知られている。すなわち、線材作製プロセスにおいて、超伝導特性の均一性の確保が極めて重要な開発項目となっている。しかしながら、テープ状の超伝導線材内の二次元面に点在する微小欠陥を、長尺に亘って高い空間分解能で高感度に検出することは極めて困難であり、局所不均一性の発生メカニズムの解明はおろか、そのための観測手法すら十分に確立されていない。実用レベルの長尺線に適用可能な、高速かつ高感度・高分解能の評価手法の確立は、高温超伝導線材開発、実用化のために喫緊の課題となっている。

本研究では、磁化した超伝導線の磁束分布より面内の磁化電流を非接触・非破壊に評価可能な走査型ホール素子顕微鏡(SHPM)をもとに、1)高速化の実現と 2)独自の解析アルゴリズムの提出によって、長尺線の評価が可能な高速磁気顕微システムを実現した。上述した要素技術を基に、km 級線材の測定が可能なリール式評価装置を構築し、36 m/h という実用的な評価速度で連続移動するテープ面内の二

次元臨界電流密度 (J_c) の分布を、世界で初めて計測することに成功した。また、従来手法による一次元的特性評価を平行して実施し、本手法と従来手法による観測結果との定量的整合性を確認した。さらに、本手法の特徴である幅方向の電流分布の情報を基に、線材の電磁気的な有効幅という新しい性能指標を定義し、長尺線材の材料パラメータとしての有用性を明らかにした。

本論文は次の 5 章からなる。

第 1 章では、本研究の背景、研究目的について記述した。

第 2 章では、本研究で使用した SHPM を用いた超伝導線材の臨界電流密度分布の評価について詳述した。磁化した線材近傍の磁気像を取得し、ピオ・サバル則の逆問題を解くことによって、面内の臨界電流密度の二次元分布の評価が可能となる。また、SHPM と既存の評価手法である四端子法及び磁気光学法との比較を行うことで本評価システムによる測定の妥当性を検証した。さらに、線材作製条件のフィードバックに関して、塗布熱分解法により作製された高温超伝導線材のガスフローの影響について示した。

第 3 章では、第 2 章に述べた SHPM での長尺超伝導線材評価のための要素技術の開発について述べた。長尺線材評価に向けた評価の高速化を実現するために、リニアモータ駆動による高速ステージを使用すると共に高速化に伴うノイズ低減のためロックインアンプを使用することで、高速かつ高精度の測定手法を確立した。一般に、SHPM での測定においては、ホール素子と線材表面間のリフトオフ距離が既知である必要があるが、長尺線材への適用を想定して、液体窒素中を連続移動する線材の高速評価のために、リフトオフ距離の計測制御は行わず、解析の過程で距離の導出を行う独自の解析アルゴリズムを提案し、その妥当性を数値シミュレーションならびに実験によって検証した。

第 4 章では、線材を液体窒素中で長手方向に搬送させながらホール素子を幅方向に高速走査させるリール式走査型ホール素子顕微鏡 (RtR-SHPM: Reel-to-Reel Scanning Hall-Probe Microscope) の手法を提案し、前章に述べた要素技術をもとに、km 級長尺超伝導線材の評価が可能な RtR-SHPM システムを開発した結果について記述した。本 RtR-SHPM を用い従来法の評価速度を 200 倍に向上した 36 m/h という実用レベルの評価速度で、液体窒素中を連続移動する超伝導テープ面内の二次元的 J_c 分布を長尺に亘って高解像度に測定するという優れた実用性能を初めて実証した。また、プロセス条件の異なる塗布熱分解法による線材を数 10 μm の空間分解能を有する磁気像によって比較評価し、プロセス条件の最適化に伴う均一性の向上を明らかにした。さらに、本評価システムによる測定結果と、従来の代表的な一次元的長尺線材評価手法である TAPESTARTM 及び四端子法の測定結果の比較を行った結果、どちらにおいても本手法により導出される結果と定量的に良い一致が得られた。さらに、本手法の特徴である幅

方向の電流分布の情報を基に、線材の電磁気的な有効幅という新しい性能指標を提出し、長尺線材の材料パラメータとしての重要性を明らかにした。

第 5 章は総括であり、本研究をまとめた。

論文調査の要旨

超伝導材料は、臨界電流密度 (J_c) 以下で損失をほとんど無視できる状態で高電流密度の通電が可能であり、磁気共鳴画像診断装置や磁気浮上式鉄道などで実用化されている。最近では特に、省エネルギー化、CO₂ 排出削減に大きく貢献できる技術として、高い臨界温度と優れた磁界特性を有する高温超伝導線材を用いた、電力機器や産業機器、先進医療機器等への応用が期待されている。超伝導線材の機器応用に際しては、km 級の長尺素線が必要となるが、局所欠陥等に起因する J_c の空間不均一性が、機器用導体の性能と信頼性を著しく劣化させる原因として知られている。すなわち、高温超伝導線材の開発において、高均一線材の作製プロセスの確立が重要な研究課題となっている。しかしながら、テープ状の高温超伝導線材内の二次元面に分布する J_c を、長尺に亘って高い空間分解能で測定することは極めて困難であり、局所不均一性の発生メカニズムの解明はおろか、そのための計測手法すら十分に確立されていない。

本研究では、磁気顕微鏡を用いて、超伝導電流から発生する磁界分布を高速かつ高感度・高解像度で評価できる J_c 評価技術を開発し、実用レベルの長尺超伝導テープ線材の通電特性評価に適用可能な事を示している。本論文は、これらの成果をまとめたものであり、以下の点で評価できる。

(1) 走査型ホール素子顕微鏡 (SHPM: Scanning Hall-Probe Microscope) において、高速・高推力のリニアモータ駆動ホール素子走査機構と、ロックインアンプを用いた高速・低雑音計測システムを開発し、従来法の約 200 倍の速度で磁気像を取得できるイメージング技術を確立している。

(2) 一般に、SHPM を用いた電流計測では、ホール素子と試料表面間のリフトオフ距離が既知である必要があるが、磁気像より電流を導出する逆問題におけるデータ解析の過程で、リフトオフ距離の導出を行う独自の解析アルゴリズムを提案し、その妥当性を数値シミュレーションならびに実験によって検証した。本手法によって、ホール素子—試料間のリフトオフ距離の計測制御は行わず、(1) の結果と組み合わせ、液体窒素中に浸漬冷却された超伝導線材の高速評価を可能としている。

(3) 磁化した線材を液体窒素中で長手方向に搬送させながら、ホール素子を幅方向に高速走査させるリール式走査型ホール素子顕微鏡 (RtR-SHPM: Reel-to-Reel Scanning Hall-Probe Microscope) の手法を提案し、上述した要素

技術をもとに、km 級長尺線材の評価が可能な RtR-SHPM システムを開発している。本システムを用いて、36 m/h という実用レベルの評価速度で、液体窒素中を連続移動する高温超伝導テープ線材の面内 J_c 分布を、数 100 μm の空間分解能で長尺に亘って測定することに世界で初めて成功している。また、本評価システムによる測定結果と、従来法による長手方向一次元分布の測定結果との比較を行った結果、定量的に良い一致が得られた。さらに、本手法の特徴である二次元的測定結果をもとに、線材の電磁気的な有効幅という新しい性能指標を提出し、長尺線材の材料パラメータとしての有用性を明らかにしている。

以上要するに、本論文は、磁気顕微法を用いた長尺高温超伝導テープ線材の臨界電流評価手法を提案し、高速評価システムを開発すると共に、その優れた実用性能を実証したものであり、電気電子工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。
