

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－ドイツ研究交流）

1. 研究課題名：「チューナブル RF システムの 1 チップ化のための先端ナノ CMOS デバイスと共存可能な NEMS/MEMS とナノ材料利用受動素子」
2. 研究期間：平成 21 年 10 月～平成 25 年 3 月
3. 支援額： 総額 14,430,000 円
4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め 6 名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	江刺 正喜	東北大学原子分子材料科学 高等研究機構	教授
研究者	田中 秀治	東北大学大学院工学研究科	准教授
研究者	林 育菁	東北大学原子分子材料科学 高等研究機構	助教
研究者	室山 真徳	東北大学原子分子材料科学 高等研究機構	助教
研究者	李 在雄	東北大学原子分子材料科学 高等研究機構	助手
研究者	蔡 燿全	東北大学原子分子材料科学 高等研究機構	助手
参加研究者 のべ 6 名			

相手側（研究代表者を含め 6 名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	Thomas Gessner	ケムニッツ工科大学 マイクロテクノロジーセ ンター	センター 長、教授
研究者	Karla Hiller	ケムニッツ工科大学 マイクロテクノロジーセ ンター	副センタ ー長
研究者	Chenping Jia	ケムニッツ工科大学 マイクロテクノロジーセ ンター	研究員
研究者	Jörg Frömel	ケムニッツ工科大学 マイクロテクノロジーセ ンター	研究員
研究者	Macro Haubold	ケムニッツ工科大学 Faculty of Electrical E ngineering	大学院生
研究者	Felix Gabler	ケムニッツ工科大学 Faculty of Electrical E ngineering	大学院生
参加研究者 のべ 8 名			

5. 研究・交流の目的

本研究交流の主たる目的は、将来の携帯無線通信機器で利用される 1 チップ可変 RF デバ

イスの鍵となる技術の開発である。具体的には、可変機能のための NEMS/MEMS、革新的な LTCC（低温同時焼成セラミックス）基板中に形成されるナノ材料による受動素子および先端ナノ CMOS 技術とのウェハレベル集積化技術である。日本側のプロトタイプによるシステムの鍵となる要素の開発と、ドイツ側のウェハレベルでのスマートシステム集積化技術を組み合わせ、小型化と低価格化を実現しうるデバイス技術を創成する。本共同研究で日独が交流を通じて相互補完的に取り組むことで、世界中どこでも使える携帯情報端末の将来方式を実現することが期待される。

6. 研究・交流の成果

6-1 研究の成果

① ナノ粒子磁性材料を用いたインダクタの性能向上と小型化、及び、受動素子を内蔵した陽極接合可能な新しい LTCC 基板の応用開発

メーカーと東北大学の共同研究で新規に開発した LTCC による世界初のシステム集積化のコンセプトが実証された。インダクタの作製に LTCC 技術を利用したことにより、三次元構築、製造プロセスの簡易化、及びデバイスの小型化が同時に実現できた。ナノ・フェライトはインダクタコアの材料としてオンチップに集積され、デバイスの性能を向上させ、インダクタンスと Q 値の増加が実証された。研究結果により、将来の小型化ワンチップチューナブル RF システムは本技術で実現できる可能性を示している。

② 可変キャパシタの小型化の実現、斬新な低電圧可変キャパシタの開発

・ 電気二重層キャパシター

マイクロ電気二重層キャパシターデバイスの試作を行い、その高周波適合性とチューナブルを調査した。深さ 400μ のキャビテの金属化は一般のフォトリソグラフィーで形成不可能なため、Aerosol ジェット技術を活用した、絶縁層である酸化物の上に異なる電極構造を印刷する方法を用いた。異なる電解質は、製作されたキャパシター電極の上へ塗られ、横に配置された電極の特定静電容量は、500 倍にも増加した。金属電極の上へカーボンナノチューブを沈澱させることによって、静電容量をさらに増やすことができ、最大 30% のチューニングが可能である。

・ 低電圧可変キャパシタ

新機能材料の利用や新発想で高機能を発揮するため、世界初の金属ガラスを用いた低電圧キャパシタの試作を行った。低いプルイン電圧の実現は静電型キャパシタにおける非常に重要なポイントである。Zr ベース金属ガラスは低いヤング率を有するため、低い電圧でプルイン動作が容易に駆動できると考える。本研究では、Zr ベース金属ガラスの優れた機械特性を利用し、キャパシタの作動機構を設計し、低プルイン電圧、高アクティブ動作力、高駆動速度を同時に達することを目標とし、試作を行った。

③ キャパシタチップモジュール・LTCC に内蔵されたナノ受動素子・LSI におけるウェハレベル集積化技術と気密パッケージの開発

・ 各素子を集積化するための常温接合技術

本研究は実用化の観点から、従来の材料に簡易なプロセスを用いてナノポーラス金 (NPG) を作製する。そのナノサイズ効果や材料物性を利用し、低温接合を実現し、異種基板の低応力接合にチャレンジする斬新な方法である。更に、NPG のナノサイズ効果とプラズマ前処理の 2 重効果により、超高真空という特殊な環境や高度平坦性を必要とすることなく、省エネの常温・低応力接合が実現された。

実用性と応用面の観点から、本研究で開発するナノポーラス金の作製法は、大面積製作ができ、MEMS プロセスと相性が良く、高価・大規模な製造装置を必要としない簡易な 2 ステップ作製法であり、他のナノ金属材料と比較して実用面での潜在力が高く、幅広い応用

が期待される。異種基板の接合材料として、ポーラス構造の低ヤング率特性は接合応力の低減に有用であり、接合面平坦性の許容範囲の広いことにより、歩留まりが向上でき、再加熱によるはんだの再溶融問題も避けられる。接合された基板は 60MPa までの高い接合強度を示し、Si、LTCC、LSI 等異なる基板で作製された多様な素子の高密度集積ができ、システムインテグレーションの著しい発展が期待できる。

- プラズマを用いた LTCC のウエハレベル低温気密パッケージング

従来の陽極接合材料ホウケイ酸ガラスと比較しながら、ウエハレベル陽極接合された LTCC-Si 基板の破壊靱性試験が検証された。300 度から 400 度をかける接合プロセスに対し、LTCC 基板の方が接合温度に大きな依存を示した。接合強度の弱い 300 度接合温度の基板に、酸素プラズマ処理をかけることにより、破壊靱性が顕著に改善され、ホウケイ酸ガラスとほぼ同じ値を示した。

接合されたサンプルはメンブレインデフレクション法を用いて検査を行い、ウエハレベルにおける気密封止が確認された。新規に開発した LTCC 技術を用いて、受動素子の高性能集積化が実現できると同時に、NEMS/MEMS に欠かせない密封密閉を行うことができる。これはウエハレベル接合で可能なので、チップサイズパッケージングが実現される。

- 「相手側との協力による研究への相乗効果」の観点から

東北大学とケムニッツ工科大学は互いに近い研究領域に携わっているが、マイクロシステムや半導体デバイスに関して互いに持っている様々な専門知識、経験、方針、装置、協力企業、利用可能材料などは異なり、互いに補完的に強みを共有できるという利点を持つ。

日本側は材料や要素技術が特長であり、ドイツのシステム集積化の視点を取り入れることで、研究内容・方法は、デバイスの設計段階からプロセスの開発、パッケージングまで、より産業に近い手法が考案された。また、プロトタイプの試作もウエハレベルに移行するため、より実用化に近いレベルの技術である。

核となる人材は両側チームのトップであり、それぞれの研究領域において長年の経験を生かして本研究を行った。当該人材が本プロジェクトに関わることで、質の高い共同研究・交流が達成され、本プロジェクトの市場価値を高めるような相乗効果が産み出された。

- 「当該研究の今後の展開見込、社会への波及効果」の観点から

各地域の無線通信規格に合わせて周波数をチューニングでき、しかも普及に十分な機器の小型化と低価格化を実現しうるデバイス技術を創成し、世界中どこでも使える携帯情報端末の将来方式に貢献するため、本研究はチューナブル RF システムの 1 チップ化のための要素デバイス・技術を開発した。

メーカーと東北大学の共同研究で新規に開発された LTCC による世界初のシステム集積化のコンセプトが実証された。新規 LTCC 基板を利用して受動素子を作製し、貫通ビアや内部配線も同時に形成が可能である。更に Si 基板との陽極接合が可能のため、簡素、低温度、高信頼な機械的封止が実現でき、3 次元受動素子のシステム集積化がより簡単に高性能で実現できる。これまでのマイクロエレクトロニクスや MEMS 技術では、このような小型化や集積化は不可能であり、ナノ技術の適用によって初めて部品のサイズを劇的に小さくすることができる。特にフィルタや共振器に利用されるインダクタや可変キャパシタは、ナノ技術によって小型化をはじめとした大きな利点を享受できる。

本プロジェクトで開発された NPG を用いた常温技術と LTCC を用いたウエハレベル気密パッケージング技術は、国際展示会で多数の企業から照会があった。このような技術は本研究だけではなく、次世代実装・集積化に必要な基盤技術の実用化として幅広く応用でき、注目を浴びている。

6-2 人的交流の成果

当該事業を端緒とした相手チーム以外の研究交流も多数あり、プロジェクト以外の課題で来日した研究員、学生も多く、延べ日数は 599 日に及ぶ。その内、学生の派遣は両大学の学術交流協定に繋がり、研究員の交流は両研究機構の学術交流協定の調印とフラウンホーファープロジェクトセンターの設立に繋がった。

- 研究者と学生の交流・訪問

プロジェクト期間内は毎年の短期/長期の研究者交流・訪問が徹底して行われた。ドイツからの研究員や学生をより長期間日本に滞在させるために、DAAD 奨学金や他の経費の申請を活用し、1046 日(平均 1 年あたり 299 日)の総滞在日数に達成した。

日本側からの交流訪問は毎年に行われ、延べ日数 125 日と徹底した交流を行った。所属は研究機構であるため学生がおらず学生の派遣はできないが、メンバー全員とも訪問・発表実績があった。計画した通り、ドイツで実験・打ち合わせ・発表を実施した。

- 共同ワークショップの開催、その他の発表

両国における共同ワークショップが計画した通りに開催された。24 年 9 月 12 日にケムニッツで開催されたジョイントプロジェクトセミナーは、日独両チームのメンバー全員の発表で、ケムニッツ大学、フラウンホーファー ENAS、ドイツ企業からの観客が集まった。25 年 2 月 22 日に仙台で開催されたジョイントワークショップは、日独両チームのメンバーを始め、両研究機構及び日本企業からの講演者もいる。観客は東北大学、十数社の日本企業、仙台市、海外の大学であり、ワークショップには予稿集が発行され、盛大に行われた。

計画外のセミナーやその他シンポジウムでのセッション設置は 3 回行われ、日独研究交流課題や連携に関し、シンポジウム等で 8 回発表した。

- 「相手側との研究交流につながる人材育成」の観点から

日本側の若手研究者は日独交流活動に尽力し、国際経験を累積し日独交流が盛んになったことで、平成 22 年より仙台市に委嘱され、MEMS マッチングサポーターに着任した。ドイツの研究機構などの海外研究者の来日に合わせ、地域企業との技術マッチングを行い、海外の最新研究成果を日本企業に紹介し、現在も MEMS マッチングサポーター活動を継続している。また、平成 17 年に結ばれた仙台市とフラウンホーファー研究機構の協定は盛んな交流があり、平成 22 年に協定を 3 年間に延長し、3 年後の今年も協定の延長を準備している。仙台市のみならず、ドイツザクセン州経済振興公社からも声をかけていただき、平成 21 年から 24 年の間、毎年招待講演に招待され、日独交流の成功事例を発表している。

本プログラム関係でドイツから来た大学院生達は東北大学でプロセス技術を習得しながら修士論文プロジェクトも行い、トップの卒業成績を修めた。内、3 名はそのお蔭で、卒業後は順調にケムニッツに所在するフラウンホーファー研究機構に就職し、現在は社会人博士を進学しながら研究機構内で活躍している。

プロジェクトのフレームワークにおいて、多くの直接的なコラボレーションが起こった。特にメンバーを協力パートナーに派遣し、密接かつ効率的な研究を遂行することは非常に有益であった。同じ分野の中でも異なる研究領域の専門知識を習得でき、両側の研究者とも研究視野が広がった。また、プロジェクトパートナーと交流したことで、科学的・技術的な技術が向上しただけでなく、異文化コミュニケーションの経験により異なる考え方が身に付き、研究者の人間的な成長に繋がった。共同研究・交流の期間中に、プロジェクトパートナーの間で、非常に緊密な関係が築かれた。東北大学で働く 1 名のポストドクは契約を終えた後、本交流をきっかけにドイツ側の研究代表者の下で研究員のポジションを得た。

- 「当該事業を端緒とした相手側との研究交流の増加/持続的発展の可能性（終了後の交流計画を含む）」の観点から

- ・ 両大学間学術交流協定締結を計画中

ドイツ側は大学院生を派遣し共同研究を遂行するため、学生が DAAD プログラムに応募し、より長い日数を滞在できた。日本に渡航してきたドイツの大学院生にとって、滞在の効果は絶大であり、東北大で徹底した研究討論・交流を行い、自分の手で実際にプロセスを行うことは、非常に勉強になったという声が多く挙がった。来日した学生達はドイツ帰国後に、交流プログラムの良さを後輩に宣伝し、結果として予想外の交流成果として、更に多くのドイツ大学院生の来日に繋がった。

本プロジェクトがきっかけで、研究室レベルの交流が大学レベルの交流に及んでいる。平成 24 年 11 月にケムニッツ工科大学の理事は東北大学を来訪し（総長も来日予定だったが、出発直前に体調不良につき断念した）、東北大学の総長、理事と面会し、大学間学術交流協定締結の話を進めた。両大学の総長、理事のコミュニケーションが始まり、研究者や学生の交流を促進することで合意し、今年内に学生の交換を目指すことになった。また、平成 25 年に東北大学の総長、理事はケムニッツ工科大学を訪問する計画で、両大学間学術交流協定を今年度中に締結する予定である。

- ・ 両研究機構の学術交流協定の調印

ドイツ側の研究代表者 Gessner 教授はフラウンホーファー ENAS の研究所所長も務めているため、ケムニッツ工科大学とフラウンホーファー ENAS 研究機構は密接な関係を持っており、フラウンホーファー ENAS も 22 年から研究員を東北大学に派遣している。共同研究や研究者の交流をより推進するため、23 年 11 月 8 日に仙台でフラウンホーファー ENAS と東北大学原子分子材料科学高等研究機構は学術交流協定を調印した。24 年 10 月に日本側の原子分子材料科学高等研究機構の機構長、教授がケムニッツに見学や打ち合わせのため渡航した。ドイツ側の研究代表者 Gessner 教授の紹介で近接する分野の研究機構も訪問し、共同研究を立ち上げし、共同研究プロジェクトに応募した。

- ・ フラウンホーファープロジェクトセンターの設立

平成 23 年に東北大学原子分子材料科学高等研究機構と学術交流協定を調印した後、フラウンホーファー本部の支援を得、24 年 4 月 1 日に東北大学内にフランホーファープロジェクトセンターが設立された。5 年の期間で、毎年ドイツより研究員数名を東北大学に派遣して共同研究を行う。共同研究の課題は本課題の他に新しい研究課題も含まれる。プロジェクト終了後の今年 6 月に、一人の研究員が新しい研究課題の共同研究のために来仙する予定。なお、ドイツ国外のフラウンホーファープロジェクトセンターは珍しく、東北大学でのプロジェクトセンターはアジアで 2 番目である。

7. 主な論文発表・特許等（5 件以内）

相手側との共著論文については、その旨を備考欄にご記載ください。

論文 or 特許	・ 論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・ 特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	備考
論文	M. Haubold, Y. -C. Lin, J. Frömel, M. Wiemer, M. Esashi and T. Gessner, "A novel approach for increasing the strength of an Au/Si eutectic bonded interface on an oxidized silicon surface", <i>Microsystem Technologies</i> , vol. 18, pp. 515-521, 2012	共著
論文	J. Frömel, Y. -C. Lin, M. Wiemer, T. Gessner and M. Esashi, "Low Temperature Metal Interdiffusion Bonding for Micro Devices", <i>Proceedings of the IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration</i> , May 21-23, pp. 163-164, 2012	共著
論文	Y. -C. Lin, W. -S. Wang, L. Y. Chen, M. W. Chen, T. Gessner and M. Esashi, "Nanoporous gold for MEMS packing applications", <i>IEEJ Trans.</i> , vol. 133, No. 2, pp. 31-36, 2013	共著
論文	Y. -C. Lin, F. Gabler, Y. -C. Tsai, S. Tanaka, T. Gessner and M. Esashi, "LTCC-based three dimensional inductors with nano-ferrite embedded core for one-chip tunable RF systems", <i>Proceedings of the international conference on solid-state sensors and actuators</i>	共著

	(Transducers '13), 2013 (to be published)	
特許	特許、基板の接合方法及び電子部品のパッケージ、日本、平成 24 年 12 月 30 日、 特願 2012-289270, 出願人：国立大学法人東北大学、発明者：Y. -C. Lin, W. -S. Wang, M. Esashi, T. Gessner	共同 発明