



TITLE:

High Power Microwave Wireless Power Transmission System with Phase-Controlled Magnetrons(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Yang, Bo

CITATION:

Yang, Bo. High Power Microwave Wireless Power Transmission System with Phase-Controlled Magnetrons. 京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-11-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22843>

RIGHT:

"Experimental Study on a 5.8 GHz Power-Variable Phase-Controlled Magnetron", IEICE Trans. Electron, Vol.E100-C, No.10, doi: 10.1587/transle.E100.C.901. "Evaluation of the Modulation Performance of Injection-Locked Continuous-Wave Magnetrons". IEEE Trans. ED, vol.66, no.1, doi: 10.1109/TED.2018.2877204. Bo Yang, Tomohiko Mitani, and Naoki Shinohara, "A 5.8 GHz Phased Array System Using Power-Variable Phase-Controlled Magnetrons for Wireless Power Transfer". IEEE Trans. MTT, doi:10.1109/TMTT.2020.3007187. "Modeling and Experiments of an Injection-locked Magnetron with Various Load Reflection Levels", IEEE Trans. ED, vol. 67, no. 9, doi:10.1109/TED.2020.3009901. "A High-efficiency Microwave Power Combining System based on Frequency-tuning Injection-Locked Magnetrons", IEEE Trans. ED, in print, 2020, doi: 10.1109/TED.2020.3013510

京都大学	博士 (工学)	氏名	楊 波
論文題目	High Power Microwave Wireless Power Transmission System with Phase-Controlled Magnetrons (位相制御マグネトロンを用いた大電力マイクロ波無線電力伝送システム)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、位相制御可能な新しいマグネトロンを用いた大電力無線電力伝送システムの研究に関してまとめたものである。具体的には、マグネトロンの出力と位相同時可制御の手法の研究、位相制御マグネトロンを用いるフェーズドアレーの構築、変調マグネトロンの通信性能の評価、低コスト電源を改良したマグネトロンシステムの開発、無線情報と無線電力同時伝送システムと高効率無線電力伝送システムの研究、についてまとめており、全7章から構成される。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の研究背景として、マイクロ波無線電力伝送の歴史や様々な応用例がまとめられ、マイクロ波無線電力伝送の有用性が述べられている。さらに本研究の核となる大電力のマイクロ波発振器の得失についてまとめられている。特にワイドバンドギャップ半導体増幅器とマイクロ波真空管との比較を行い、本研究で取り上げるマイクロ波真空管の一つであるマグネトロンの優位性と、解決すべき課題をまとめ、本論文の着眼点を明確にしている。</p> <p>第2章では電力可変型の位相制御マグネトロンの研究開発についてまとめている。従来の位相制御マグネトロンで用いられている注入同期法をベースに、新しいPLLフィードバックループ手法を導入しており、その結果従来の陽極電流位相制御法では制御できなかった5.8 GHzマグネトロンの位相制御を可能とした。この新しい制御手法は5.8GHzマグネトロン以外の考え得る様々なI-f特性を持つマグネトロンすべてに適用可能である。汎用性の高いマグネトロン位相制御及び出力電力の制御方法を開発に成功したといえる。開発した電力可変位相制御マグネトロンは雑音レベルを-50 dB以下に抑えることに成功し、その上で位相制御時間を50 μs以内に短縮し、位相制御精度$\pm 1^\circ$以内を実現することができた。マグネトロンの磁場改造不要で、出力電力が160~329Wの可変範囲を備えた。</p> <p>第3章ではマグネトロンでビーム方向を制御するフェーズドアレーを構築する際の課題を整理し、それを踏まえマグネトロン・フェーズドアレーを構築した。まずシステムに最適なスロットアンテナの設計と開発を行った。開発したスロットアレーアンテナと4台の電力可変位相制御マグネトロンを用いる2\times2の形でフェーズドアレーを構築した。その結果、電波の送電方向が制御でき、かつ送電電力を可変とするマグネトロン・フェーズドアレーを実現することができた。マグネトロン・フェーズドアレーの出力位相の制御により、送電方向制御機能の検証を行った。マグネトロン・フェーズドアレーの送電方向は2次元で$\pm 3^\circ$範囲で制御できることを実証した。マグネトロンの数を展開することにより、送電方向の可制御範囲が更に広くすることも可能である。マグネトロン・フェーズドアレーにおいて、最大出力電力として1870W、DC\rightarrowRFの最大変換効率として61.0%を得た。無線電力伝送実験において、送電距離の変更により伝送効率の変化を定量的に計算した。5 mの距離でマイクロ波無線電力伝送実験を行った結果、マグネトロン・フェーズドアレーの出力マイクロ波電力を1304 Wとした場合、受電側のDC出力電力は142 Wに達した。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	楊 波
<p>第 4 章では位相制御マグネトロンの研究を発展させ、マグネトロン出力の変調性能を発見し実現した。これまでにない高速通信可能なマグネトロンの開発についてまとめている。実験の結果、従来は不可能とされた 10Mb/s の通信速度を実現できた。また、現在の一般通信でよく用いられる ASK(振幅偏移変調)、PSK(位相偏移変調)、FSK(周波数偏移変調)の各変調の実現手法を確認し、通信速度(帯域幅)とマグネトロンの注入出力電力比の関係を明らかにした。さらに、疑似ランダム信号を変調波として変調精度やエラー率など定量的なパラメータでマグネトロンの変調品質を評価した。この変調マグネトロンの出力により、音声、ビデオ、データの伝送も検証できた。本成果で特許も取得している。</p> <p>第 5 章では過去の研究では高安定度かつ高価な直流安定化電源を必要としていた位相制御マグネトロンの問題点に着眼した研究についてまとめている。位相制御マグネトロンの各種性能はフェーズドアレーや変調には十分なものであったが、高安定度の電源を必要としており、マグネトロンの特徴の一つであるコストの安さが失われていた。そこで商用電子レンジに用いられている安価な電源を改良して、位相制御マグネトロンを構築することを目指した。商用電子レンジに用いられている半波倍電圧電源は電圧変動が大きい。改良した新しい電源は、コスト上昇を最小限にしながら電圧安定度の向上を実現している。その結果従来の出力電圧が不安定な電子レンジ用半波倍電圧電源では制御できなかった位相制御マグネトロンシステム、変調マグネトロンシステム、マグネトロン出力合成システム等でも各種制御を可能にし、非常に安価な位相制御マグネトロンを実現することができた。改良した電源のリップル率は 1%以下を実現し、マグネトロンの位相制御精度も $\pm 1^\circ$ 以内までに至っている。周波数変調のシステムでもビデオデータを伝送することを実現した。改良した電源で構築したマグネトロン合成システムにおいて、合成効率も 94.5%までに実現した。</p> <p>第 6 章では様々な位相制御マグネトロンを用いた大電力マイクロ波無線電力伝送システムの実験についてまとめている。電力と情報を同時に伝送する時の、お互いに干渉しないための条件を述べたうえで、同じマイクロ波を使った電力と情報を同時に伝送するシステムを開発した。5.8GHz のマグネトロン・フェーズドアレーを用いる電力と情報伝送システムで、送電方向を振りながらビデオ情報を伝送することに成功した。第 4 章で紹介した 2.45 GHz の変調マグネトロンと第 5 章で紹介した電子レンジから改良した電源を用いた実験では、伝送距離約 3.5 m でマグネトロンの出力マイクロ波により、テレビ情報とテレビ電力が同時伝送することに成功した。本研究により 300W 級送電電力のワイヤレステレビを発明した。さらに、5.8 GHz マグネトロン無線電力伝送システムでは、送電アンテナ、送電距離、送電周波数などを変化させた無線電力伝送実験を行った。伝送距離 5.6 m で、システムの全体効率 9.73%を実現した。最後に高効率の無線電力伝送システムの構築方法も議論した。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約されている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、位相制御可能な新しいマグネトロンを用いた大電力無線電力伝送システムの研究に関してまとめたものである。本論文で得られた成果は以下のとおりである。

1. 注入同期法をベースに、従来の陽極電流位相制御法では制御できなかった 5.8 GHz マグネトロンの位相を制御でき、汎用性の高いマグネトロン位相制御及び出力電力の制御方法を開発した。開発した電力可変位相制御マグネトロンの雑音レベルを -50dB 以下に抑えた上で位相制御時間を 50 μ s 以内に短縮し、位相制御精度 $\pm 1^\circ$ 以内を実現した。
2. 4 台の電力可変位相制御マグネトロンを 2 \times 2 の形で配列し、電波の送電方向が制御でき、かつ送電電力を可変とするマグネトロン・フェーズドアレーを構築した。マグネトロン・フェーズドアレーの出力位相の制御により、送電方向制御機能の検証を行った。マグネトロン・フェーズドアレーにおいて、DC \rightarrow RF の最大変換効率として 61.0%を得た。マグネトロン・フェーズドアレーの出力マイクロ波電力を 1304 W とした場合、5 m の距離でマイクロ波無線電力伝送実験を行った結果、受電側の DC 出力電力は 142 W に達した。
3. 位相制御マグネトロンの研究を発展させ、マグネトロン出力の変調性能を発見し、これまでにない高速通信可能なマグネトロンの開発に成功した。実験の結果、10Mb/s の通信速度を実現できた。振幅/位相/周波数の各変調の実現手法を確認し、通信速度(帯域幅)とマグネトロンの注入出力電力比の関係を明らかにした。本成果で特許も取得している。
4. 過去の研究では高安定度かつ高価な直流安定化電源を必要としていた位相制御マグネトロンを改良し、非常に低コストの電源で位相制御マグネトロンを実現することに成功した。開発した新しい電源は位相制御マグネトロンシステム、変調マグネトロンシステム、マグネトロン出力合成システムなどに応用可能であった。
5. 様々な位相制御マグネトロンを用いた大電力マイクロ波無線電力伝送システムの 実験を行った。2.45 GHz の変調マグネトロンを用いた実験では、伝送距離約 3.5 m でマグネトロンのみでテレビ情報と無線電力の同時伝送に成功した。さらに 5.8 GHz マグネトロン無線電力伝送システムでは、伝送距離 5.6 m で、システムの全体効率は 9.73%を実現した。

以上を要するに、本論文は位相制御マグネトロン技術を中心に、マイクロ波送電システム構築を行い、マグネトロンの出力と位相同時可制御の手法の研究、位相制御マグネトロンを用いるフェーズドアレーの構築、変調マグネトロンの通信性能の評価、低コスト電源を改良したマグネトロンシステムの開発、無線情報電力伝送システムと高効率無線電力伝送システムの研究、についてまとめたものである。本論文は位相制御マグネトロンの研究開発を通じ、マイクロ波無線電力伝送システムの社会実装性向上の見通しを与えており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 2 年 10 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。