

Glass Substrate 기반 Varactor-Tuned RIS 설계 및 성능 검증

홍석연, 남승구, 최세환
한국전자기술연구원

sy116.hong@keti.re.kr, senggu@keti.re.kr, shchoi@keti.re.kr

Design and Performance Evaluation of a Varactor-Tuned RIS Based on a Glass Substrate

Seokyeon Hong, Seunggoo Nam, Sehwan Choi
Korea Electronics Technology Institute

요 약

본 논문에서는 건축 구조물과의 통합 가능성을 고려하여 Glass Substrate(유리 기판) 위에 **Varactor 기반 Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)**를 구현하고, 해당 구조의 위상 조절 및 빔 조향 성능을 평가하였다. 유리 기판의 가공 한계를 고려하여 TID(Thermally Induced Diffusion) 공정을 활용해 상하단 패턴을 형성하였고, SMT 방식으로 Varactor 와 PIN 다이오드를 실장하여 유닛셀 단위의 위상 가변 구조를 설계하였다. 시뮬레이션 결과, 해당 구조는 270° 이상의 위상 조절 범위를 확보하며, 15° 입사각 기준 최대 50° 까지의 반사 빔 조향이 가능함을 보였다. 해당 연구는 도심 밀집 환경 및 투명 구조물 기반 스마트 RIS 시스템 구현에 기여할 수 있다.

I. 서 론

6G 시대의 무선 네트워크는 고주파 대역에서의 커버리지 확보와 에너지 효율 개선을 동시에 달성해야 하는 과제를 안고 있다. 이에 따라 **Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)**는 스마트 중계기 기술의 한 축으로 부상하고 있으며, 반사형 구조를 기반으로 전파의 전파 경로를 능동적으로 제어할 수 있는 가능성을 제공한다. 최근에는 RIS 를 건물 외벽, 창호, 실내 유리벽 등 실제 구조물에 통합하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이로 인해 유리 기판을 활용한 구현 기술이 주목받고 있다. 그러나 유리의 낮은 공정 유연성은 Via 형성 및 다층 구조 설계에 제약을 주며, 이러한 한계를 극복하기 위한 설계 전략이 요구된다. 본 연구에서는 유리 기판 기반 RIS 구조에서 Varactor 를 활용한 위상 조절 메커니즘을 도입하고, SMT 기반의 구성 요소 실장을 통해 실현 가능한 구현 구조를 제안한다. 또한, 시뮬레이션 기반 빔 조향 성능 평가를 통해 RIS 의 위상 제어 가능성 및 커버리지 확장 잠재력을 검토한다.

II. RIS 설계 및 구현 방법

RIS 구조는 유전율 6.9, 손실 탄젠트 0.025 의 유리 기판을 기반으로 하며, 상부/하부 금속 패턴은 TID 공정을 통해 형성하였다. 유리 기판 내 TGV(Through-Glass Via) 공정은 생략하였으며, 이를 보완하기 위해

동일한 Bias 라인을 공유하는 유닛셀 제어 구조를 설계하였다. 각 유닛셀에는 2 개의 Varactor 가 SMT 방식으로 장착되었고, $0.3\text{pF} \sim 1.2\text{pF}$ 범위의 커패시턴스 제어를 통해 최대 270° 의 위상 변화 범위를 구현하였다. 시뮬레이션에서는 위상차 180° 를 기준으로 빔 조향 특성을 분석하였으며, 15° 입사각 기준으로 반사파의 조향 범위는 22° 에서 최대 50° 까지 변조 가능한 것으로 나타났다. 또한, 금속 패턴은 Mesh Grid 형태로 구성하여 광투과성을 유지하면서도 RIS 의 전자기적 기능을 실현할 수 있는 형태로 설계하였다.

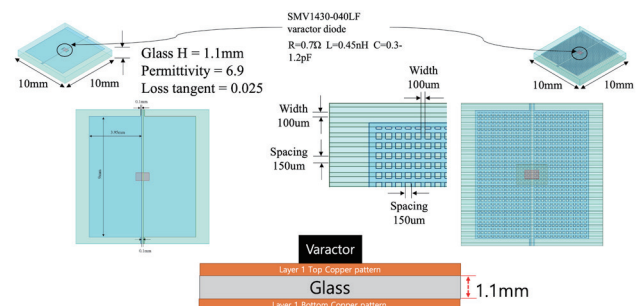


Fig 1. Unitcell structure

III. 성능 평가 및 결과

설계된 구조의 시뮬레이션 결과, 위상 변화에 따른 반사 특성의 변화가 뚜렷하게 나타났으며, 고주파(28GHz 대역)에서 빔 조향 제어가 효과적으로 구현됨을 확인하였다. 특히, Varactor 제어 전압 변화에 따라 반사 각도와 반사 이득이 유의미하게 변화하는 것을 관측함으로써, 능동적 위상 조절이 가능한 RIS 구조의 실효성을 검증하였다. 또한, 전체 유닛셀 배열에서 단일 Bias 라인 구조로 위상 일관성을 확보하였으며, 이는 실사용 환경에서의 제어 회로 간소화 및 시스템 안정성 측면에서 유리한 결과를 도출할 수 있다.

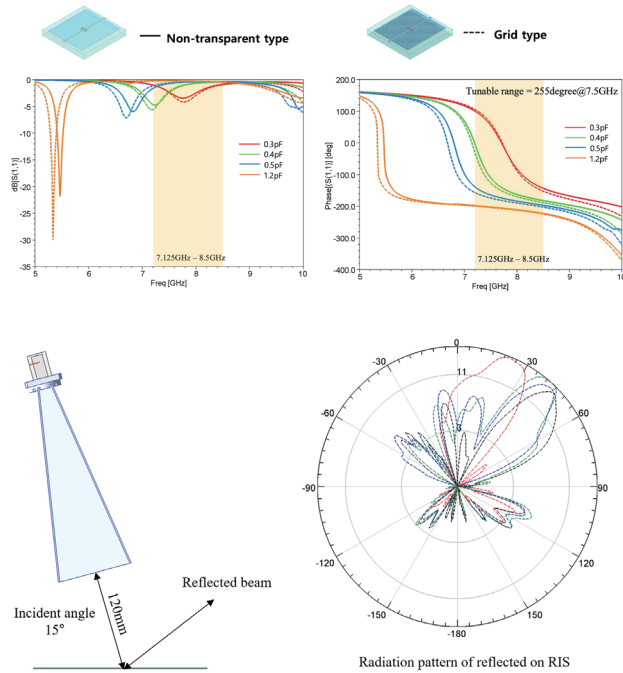


Fig 2. Simulation environment and result

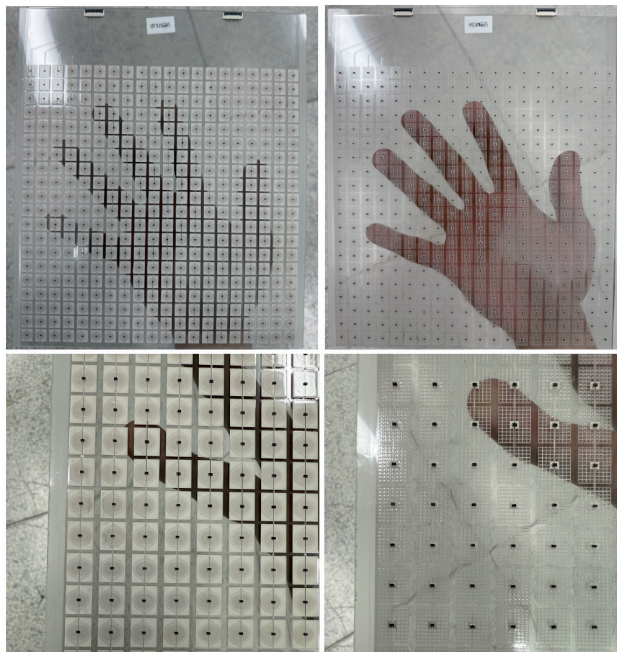


Fig 3. Sample production

IV. 결론

본 연구에서는 유리 기판 기반 RIS의 구현 가능성을 확인하고, Varactor 기반 위상 조절 구조를 적용함으로써 능동 제어형 반사 표면의 빔 조향 성능을 검증하였다. 시뮬레이션을 통해 약 270°의 위상 가변성과 최대 50°까지의 반사 각도 조절 범위를 확인하였으며, 이는 스마트 빌딩, IoT 통신환경, 6G 밀리미터파 커버리지 확장 등 다양한 응용 분야에서 유리 기반 RIS 기술의 가능성을 시사한다. 향후에는 실측 기반의 프로토타입 제작 및 OTA 성능 평가를 통해 본 연구의 결과를 실증적으로 확장하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 차세대네트워크(6G) 산업기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [RS-2024-00395366, Upper-mid Band Smart 중계기용 RIS 및 NCR 부품기술 개발]

참 고 문 헌

- [1] Y. Youn et al., "Liquid-Crystal-Driven Reconfigurable Intelligent Surface With Cognitive Sensors for Self-Sustainable Operation," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 71, no. 12, pp. 9415-9423