

밀리미터파 회로 기술의 개관 및 동향

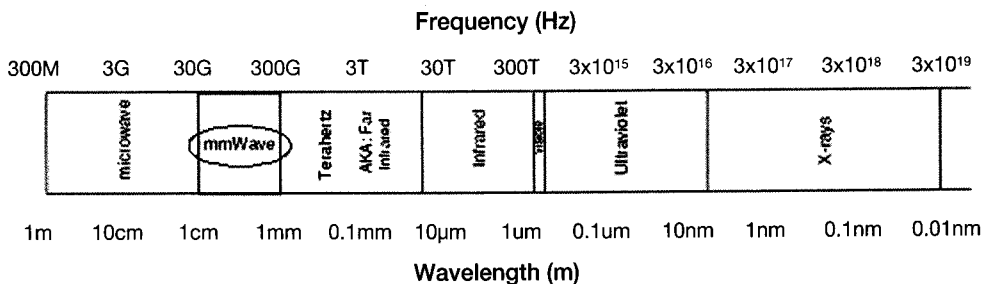
이재성(고려대학교 전기전자전파공학부)

1. 서론

오늘날 우리는 빠르게 발전하는 정보화 사회에 살고 있다. 사회 구조의 정보화가 가속됨에 따라 사람과 사람, 기기와 기기, 그리고 사람과 기기간에 교환되어야 하는 정보량 또한 급격히 증가하고 있다. 이는 보다 빠른 정보 전송속도를 제공하는 통신 시스템에 대한 수요의 증가로 나타나고 있다. 이러한 통신 시스템의 전송속도를 향상시키기 위한 방법에는 여러 가지가 있을 수 있으나, 그 중 가장 효과적인 수단으로서 통신 대역폭의 증가를 들 수 있다. 이는 Shannon의 법칙($C = B \cdot \log_2(1+S/N)$, C: 채널 용량, B: 대역폭, S/N: 신호대잡음비)에

서도 쉽게 보여진다. 보다 넓은 대역폭을 가지는 통신 시스템을 구현하기 위해서는 보다 높은 주파수에서 동작하는 회로의 구현이 필수적이다. 이에 따라 통신 시스템에 적용되는 초고주파회로의 동작주파수는 지속적인 증가 추세를 보여왔으며, 이 경향에 따라 최근 들어서는 밀리미터파($1\text{mm} \leq \lambda < 1\text{cm}$, 또는 $30\text{GHz} < f \leq 300\text{GHz}$. 그림 1 참조)에서 동작하는 회로에 대한 관심이 크게 증가하고 있다.

우수한 성능을 가지는 밀리미터파 회로의 개발에는 여러 가지 어려움이 따른다. 우선적으로 밀리미터파 대역에서의 회로 동작을 가능하게 하는 소자기술이 확보되어야 한다. 현재 몇 가지의 소자기술이 이 대역의 동작을 지

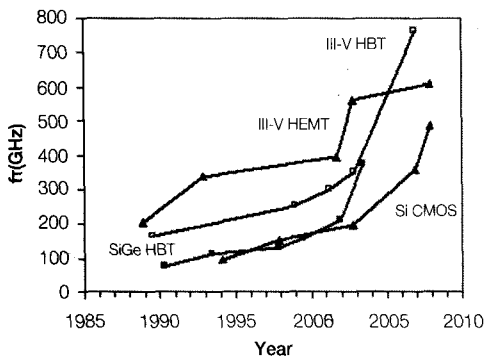


〈그림 1〉 전자기파 스펙트럼 내의 밀리미터파(mmWave)범위

원하고 있으나, 이들 간의 장단점 분석 및 원하는 응용분야에 대한 최적의 선택이 쉽지 않다. 소자기술이 결정되더라도 회로 설계 단계에서도 또 다른 난점이 존재한다. 상대적으로 낮은 수 GHz 대역 회로 설계에서는 크게 고려하지 않았던 부분들이 밀리미터파 영역에서는 중요한 요소로 등장하게 된다. 본 고에서는 이러한 밀리미터파 회로 개발에 수반하는 난점들을 단계적으로 분석하고, 현재 시점에서의 기술 개발 현황을 간단히 살펴보도록 한다.

II. 밀리미터파 소자기술

밀리미터파를 포함한 고주파회로에 사용되는 소자가 갖추어야 할 가장 중요한 특성으로서 동작속도를 들 수 있다. 소자의 동작속도가 증가하면 주어진 주파수에서의 회로동작에 있어 이득이 증가하고 고주파잡음 특성이 개선될 뿐 아니라, 전력소모에 있어서도 상대적인 이점을 가지게 된다. 잘 알려진 바와 같이 소자의 동작속도를 나타내기 위해 일반적으로 사용되는 파라미터는 f_T (cutoff frequency)



〈그림 2〉 대표적인 소자기술의 f_T 증가추세(최고치)

와 f_{max} (maximum oscillation frequency)이다. 이들은 각기 전류이득(current gain) 및 전력이득(unilateral power gain)이 1이 되는 주파수로 정의된다. 밀리미터파를 포함한 고주파회로에서의 여러 가지 성능 예측에 있어서는 f_{max} 가 f_T 보다 더 중요하게 작용을 하는 것으로 알려져 있다. 반면 f_{max} 는 주파수가 증가할수록 그 값의 정확한 추출이 어려워지는 경향이 있고, 개별 소자의 레이아웃에 따라 값이 민감하게 변하기 때문에 일반적으로 ‘소자기술’을 평가하는 기준으로는 f_T 가 널리 사용된다. 대표적인 소자기술에 대해 보고된 최고의 f_T 값 증가추세가 그림 2에 정리되어 있다.

그림 2에서 보는 바와 같이 III-V족 화합물 반도체 계열의 HBT 및 HEMT 소자기술이 여전히 동작속도에서의 우위를 점하고 있으며 이들의 f_T 값 최고치는 현재 각기 765GHz 및 610GHz에 이르고 있다. 이들의 우월한 동작속도는 뛰어난 전자전송특성에 기인하고 있다. 주로 GaAs 혹은 InP에 기반한 화합물반도체 시스템은 기본적으로 전자의 전송도(mobility)가 실리콘에 비해 뛰어난 뿐 아니라 전자가 순간적으로 높은 전자장 영역에 진입할 때 발생하는 탄도전송특성(ballistic transport)도 뛰어나기 때문에 이들에 기반한 n-channel 소자는 기본적으로 뛰어난 동작속도를 보이게 된다.

그러나 한편으로 이들 소자는 전반적으로 비평평(non-planar) 구조를 가지고 있어 소자 주요 영역의 노출로 인해 표면 특성 영향에 취약하고, 이를 억제해 줄 적절한 보호막(passivation) 물질의 부재로 인해 경계 특성의 문제도 잠재적으로 지니고 있다. 또한 에피층으로 형성된 소자의 동작 영역도 실리콘에 비해 상대적으로 높은 defect density를 보이는 경향이 있다.

이들과 같은 특성들은 누설전류의 증가를 가져오게 되고 더 나아가 고온 혹은 장시간 동작에 대한 소자 및 회로의 신뢰성에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이들을 보완하기 위한 기술들의 개발이 상용화 및 대량생산에 있어 관건이 되고 있다.

실리콘 소자기술에 비해 상대적으로 높은 제작비용도 화합물반도체 기반 소자기술 및 이의 고주파회로 응용에 있어서 상대적인 단점으로 흔히 지적된다. 이는 고가의 기관 가격 및 소구경의 웨이퍼 크기(4"-6" vs. 실리콘의 8"-12"), 그리고 고비용의 에피성장 공정과 e-beam노광 기술 등에 기인하고 있다. 그러나 일각에서는 소자기술의 전체 비용은 칩 제작 비용(die cost)만으로 결정되는 것이 아니고 추가적인 패키징 비용 및 테스트 비용이 모두 고려된 최종 비용에 기반하여 산출되어야 한다는 주장도 있다. 패키징 및 테스트 비용은 실리콘 소자기술과 크게 다르지 않으므로 순수한 칩 제작에 있어서의 고비용 영향은 전체 비용에 희석되어 나타나게 된다는 것이다. 또한 일반적으로 짧은 공정 기간(~1개월 vs. 실리콘의 ~3개월)도 비용으로 환산되어 고려된다면 전체 비용을 낮추는 방향으로 작용된다고 볼 수 있다. 결국 소자기술에 있어서 비용의 문제는 비용 산출 방식 혹은 범위에 따라서 크게 달라질 수 있기 때문에 단정적인 판단은 어려운 면이 있다.

SiGe HBT 및 Si CMOS와 같은 실리콘 기반 소자기술은 전통적으로 화합물반도체 기반 소자기술에 비해 동작속도가 낮고, 따라서 밀리미터파 회로에는 적용되기 힘들다는 인식이 있어 왔다. 그러나 그림 2에서 보여지듯이 최근 들어 이들 소자기술은 동작속도 향상에

있어서 큰 진전을 보이고 있다. SiGe HBT의 경우 2000년대 초반 375GHz의 f_T 를 보이는 소자가 발표되었으며, Si CMOS는 2000년대 중반에 집중적인 RF응용이 대두되면서 가파른 동작속도의 증가를 가져와 최근 f_T 가 485GHz에 달하는 소자가 발표되기에 이르렀다. 기존 실리콘 소자의 동작속도가 화합물반도체 소자에 많이 뒤처진다는 인식은 앞서 밝힌 바와 같이 전자 전송도의 차이에 기반하였다. 그럼에도 불구하고 이와 같이 실리콘 소자가 화합물반도체 소자에 대해 최근 비견할만한 속도 특성을 보이는 주 요인으로서는 고도로 발달된 실리콘 공정기술을 들 수 있겠다. 디지털 및 메모리 CMOS기술의 발전과 동반하여 발전해온 실리콘 공정기술은 일반 광학적 노광 기술에 기반한 고도의 스케일링을 가능하게 하고 소자 구조의 최적화를 가져옴으로써 실리콘 소자의 RF특성 향상에도 큰 견인차가 되었고, 이는 앞으로도 계속될 것으로 보여진다.

그 절대값에 있어서는 아직 실리콘 소자기술의 동작속도가 화합물 반도체 소자에 못 미치고 있는 것이 사실이다. 그러나 동작속도 이외의 면에서 고주파 회로에의 적용에 더 유리하게 작용하는 특성도 가지고 있다. 우선 통신 시스템에서 베이스밴드 부분을 구성하는 디지털 회로와의 집적을 가능하게 한다. 이는 칩간 인터페이스에 기인한 전기적 특성 및 신뢰성 저하를 막을 수 있고 추가 비용의 감소를 가져온다. 또한 실리콘 기술은 구조적으로 편평(planar)공정이고 물질적으로 양질의 실리콘에 기반한다. 따라서 화합물반도체 기술에 비해 상대적으로 뛰어난 전기적 신뢰성을 보여준다. 고도로 발달한 실리콘 기반 회로 설계 환경도 장점으로 작용한다. 정교하게 발달된 실리콘

기본 소자의 모델 및 각종 설계 기능은 첫 공정에서의 성공확률을 끌어올리는데 기여한다.

같은 실리콘 기반 소자기술 간에도 나뉠대로의 장단점이 존재한다. SiGe HBT기술은 2000년대 초반까지만 해도 Si CMOS소자기술에 비해 동작 속도 면에서 강점을 가지고 있었으나, 지난 수 년간의 CMOS소자의 가파른 성능향상의 결과로서 그 우위를 내어주는 양상을 보이고 있다. 그러나 바이폴라 계열 소자에 수반되는 우수한 트랜스컨덕턴스 및 $1/f$ 잡음 특성, 그리고 탁월한 소자간 매칭 특성은 아직도 많은 회로 설계에 있어서 매력적인 요소로 작용한다. 또한 상대적으로 넓은 최소 선폭으로도 우수한 성능을 보인다는 점도 스케일링에 따른 비용부담이 빠르게 늘어나는 추세에 비추어 볼 때 비용상의 장점으로 작용할 수 있다. 반면 CMOS소자기술은 상대적으로 공정이 간단하고, 디지털 공정과의 호환성을 극대화할 수 있으며, 회로 및 시스템 설계에 있어서 능동소자가 단일화 되는데 따르는 설계 환경의 단순화를 가져올 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 SiGe HBT와는 달리 f_{max} 값이 소자의 레이아웃에 의해 크게 조절되므로 회로 설계 단계에서도 소자의 성능에 대한 최적화가 가능하다는 점을 지니고 있다.

밀리미터파 회로의 설계에 있어서 사용되는 소자기술은 이와 같은 여러 가지 요소를 다방면으로 고려하여 결정되어야 한다. 전반적인 경향은 점차 실리콘 기반 소자기술이 기존의 화합물반도체 기반 소자기술을 대체해가는 추세라고 볼 수 있다. 실리콘 기술 중에서도 초반에 집중되었던 SiGe HBT소자기술에 대한 관심이 점차 Si CMOS소자기술로 옮겨가는 양상을 보이고 있다는 점도 주목할 만 하다고 하겠다.

III. 밀리미터파 회로 설계의 난점

최근의 파운드리 업체들은 완성도 높은 PDK(process design kit)를 회로 설계자들에게 제공하고 있으며, 이는 잘 발달된 스케일가능 소자모델(scalable device model) 및 P-cell(parametric cell)을 포함하고 있다. 따라서 수 GHz 대역의 RFIC설계에 있어서는 이들 모델 및 P-cell에 의지하여 회로 설계 및 레이아웃을 수행한 후 검증 기능(verification tool)을 거쳐 설계를 최종 마무리하는 과정의 비교적 수월한 회로 개발 절차를 밟는다. 반면 밀리미터파 회로의 설계는 여러 가지 난점으로 인해 이와 같이 규격화된 틀 내에서 이루어지기 힘든 면을 가지고 있다. 이러한 난점 중 대표적인 것이 소자 모델링 및 연결선 기생성분(interconnect parasitic)관련 문제이며 이에 대해 간단히 고찰을 해 보고자 한다.

파운드리에서 제공하는 소자 모델은 현실적으로 일정 주파수까지만 그 정확성을 보장한다. 예를 들어 Si RFCMOS공정의 경우 제공되는 소자 모델은 대개 ~20GHz근방의 주파수 대역까지만 신뢰가 가능하다. 따라서 밀리미터파 회로의 설계에 있어서 PDK를 통해 제공되는 모델에만 기반하는 경우 시뮬레이션 결과와 상당히 동떨어진 측정결과를 얻기 쉽다. 이러한 이유 때문에 밀리미터파 회로 개발에 있어서는 사용하고자 하는 공정에 대해 직접 테스트 소자를 제작하고, 이에 기반하여 원하는 주파수대역 근방까지 자체 모델링(in-house modeling)을 수행한 후, 이 모델에 기반하여 회로 설계를 수행하는 것이 일반적이다. 이는 능동소자와 수동소자 모두에 대하여 해당하며, 이를 각각의 경우에 대해 좀더 자세히

살펴보면 다음과 같다.

파운드리 소자모델은 일반적으로 스케일이 가능하며, 능동소자의 경우 그 구조는 다양한 스케일 변수에 의해 결정된다. CMOS소자를 예로 들자면 게이트 길이, 단위 *finger*의 게이트 폭, *finger*개수 등이 변수로 제공된다. 설계자 측이 자체적으로 개발하는 밀리미터파 모델도 이들 변수를 모두 고려한 스케일가능모델이라면 가장 이상적인 것이다. 그러나 많은 경우 설계자 측에 있어서는 투자할 수 있는 모델링 재원이 제한되기 마련이다. 따라서 이 경우에는 모델링 범위를 축소, 회로에 실제로 사용되는 소자들에 대해서만 선택적 모델링을 수행하거나 일부 파라미터에 대해서만 적용되는 부분적 스케일가능 모델을 확립하는 것이 해결책이 될 수 있다. 또한 주어진 소자 내에서의 수정 대상 모델 파라미터 범위도 축소하는 것이 현실적이다. 소자 모델의 코어 파라미터들을 수정대상으로 고려하는 경우 모델링 작업이 지나치게 방대해 질 수 있다. 이에 기관 파라미터나 전극의 기생소자와 관련된 파라미터만을 대상으로 수정을 한다면 적은 투자로도 상당히 정확성이 개선된 모델을 얻을 수 있다.

수동소자의 경우에도 기본적으로 능동소자의 경우와 같이 테스트소자를 제작하고 이에 대한 자체 모델을 확립하는 절차를 밟는 것이 정규 수순이라 할 수 있다. 반면 수동소자에만 적용될 수 있는 또 하나의 방법은 잘 발달된 EM(electromagnetic)시뮬레이션 툴을 활용하는 것이다. 밀리미터파 회로에 흔히 사용되는 MIM(metal-insulator-metal)캐패시터, 박막 저항, 인덕터, 트랜스포머, 전송선 (transmission line)등은 모두 EM 시뮬레이터를 통해 그 특성 예측이 가능하다. 따라서 테스트소자 제작의

단계를 거치지 않고 직접 모델을 확립하는 것이 가능하다. 물론 예측성을 향상시키기 위해서는 유전율, 비저항과 같이 소자를 구성하는 부분의 재료적 특성 및 두께(vertical dimension) 등에 대한 정확한 정보를 확보하고 있어야 하나 일반적으로 파운드리에서 이들 정보는 설계자들에게 제공을 한다. 다만 주의하여야 할 점은 EM시뮬레이션 툴 내의 각종 파라미터 선택값 결정이 정확하지 않은 경우 결과값이 실제와 크게 차이가 날 수 있다는 사실이다. 이런 점까지 고려한다면 수동소자의 경우에도 테스트 소자를 일부에 대해서라도 제작하여 측정을 수행하고 시뮬레이션 결과와 비교하여 그 정확성을 검토하는 절차를 거치는 것이 권장된다. 또한 두 개 이상의 서로 다른 시뮬레이션 툴을 사용하여 그 결과 값을 교차 비교해 보는 것도 시뮬레이션 의존에 의한 위험성을 감소시킬 수 있는 한 방안이 될 수 있다.

밀리미터파 회로의 수동소자 기능을 구현하기 위한 방법으로는 전통적인 RLC에 기반한 집중 방식(lumped approach)과 전송선에 기반한 분산 방식(distributed approach) 두 가지가 있을 수 있다. 집중 방식의 경우에 있어 제한된 자기공진주파수(SRF, self-resonance frequency) 때문에 인덕터와 같은 수동소자는 밀리미터파와 같은 높은 주파수 대역에서 사용이 어려울 것이라는 인식이 있으나, 이는 정확하지 않다. 밀리미터파 회로의 장점 중 하나는 요구되는 수동소자 값의 크기가 작다는 점이다. 일반적으로 일정 리액턴스를 구현하기 위해 요구되는 수동소자의 값은 주파수에 반비례한다. 인덕터를 예로 들자면 같은 리액턴스를 구현하기 위해 60GHz에서 요구되는 인덕턴스 값은 2GHz에서 요구되는 값의 1/30에 불과하다.

이는 밀리미터파 대역에서 사용되는 수동소자의 사용 면적의 감소와 더불어 SRF의 증가를 가져온다. 실제로 60GHz에서 흔히 사용되는 100pH전후의 인덕터는 100GHz가 훨씬 넘는 SRF를 보인다. 하지만 현실적인 문제점은 일반적으로 파운드리가 이런 작은 값의 인덕터를 제공하지 않거나 제공되더라도 이들은 사용에 최적화되어 있지 않다는 점이다. 이 때문에 밀리미터파 회로 설계에 있어서는 작은 금속 선폭을 가지는 소형 나선형 인덕터나 선형 인덕터를 직접 모델링 하여 사용할 것이 권장되며, 이들에 대해서는 제공되는 P-cell이 존재하지 않으므로 레이아웃을 직접 수행하여 작업하여야 한다.

전송선으로서는 microstrip line과 CPW(coplanar waveguide) line 및 이 두 가지의 혼합 형태인 GBCPW(ground-backed CPW) line 등이 흔히 사용된다. 실리콘 공정의 경우 microstrip line과 GBCWP line의 접지면(ground plane)은 폴리실리콘 혹은 1st메탈 층으로 이루어지며 실리콘 기판 보다 위쪽에 형성되는데, 이는 기판 아랫면에 일반적으로 접지면이 형성되는 화합물 반도체 기반 공정기술과 대별된다. 이는 비저항이 상대적으로 낮은 실리콘 기판에서의 신호 감쇠를 최소화하기 위한 노력의 일환이며, 같은 이유에서 기판과 접지면으로 분리되어 있지 않은 기본적 CPW line은 높은 감쇠율로 인해 실리콘 공정에서는 권장되지 않는다. 밀리미터파가 시작되는 30GHz에서 이들 전송선의 $\lambda/4$ 값은 진공에서 2,500 μm , 산화막 내에서는 약 1,250 μm 이며, 주파수의 증가에 반비례하여 감소한다. 전송선을 사용한 분산 방식 설계의 큰 문제점은 전송선의 모델이 아직까지는 실리콘 파운드리에서 일반적으

로 제공되지 않는다는 데 있다. 따라서 전송선도 역시 자체 모델링에 의존할 것이 요구된다.

모델링 문제와 함께 밀리미터파 회로 설계시 고려되어야 하는 부분이 연결선 기생성분 추출이다. 앞서 기술한 대로 주파수가 증가할수록 요구되는 수동소자의 값은 작아진다. 이로 인한 장점으로는 앞서 밝힌 바와 같이 면적 감소, SRF증가 등이 있으나, 이로 인한 큰 문제점이 바로 연결선 기생 성분의 상대적인 영향 증가이다. 수 GHz대역 회로에서는 주변의 수동소자 값에 비해 그 기생 성분 값이 크게 작아 무시되거나 기본적인 고려만으로도 충분했던 길이의 연결선이라도, 밀리미터파 회로에 사용되게 되면 주변 수동소자의 작은 값 때문에 상대적으로 회로 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 이들에 대한 정밀한 기생 성분 값 추출 및 모델링이 반드시 이루어져야 한다.

이를 위한 한가지 방법은 일반적인 상용 파라미터 추출 프로그램을 사용하는 것이다. 그러나 이 때에도 GHz대역 회로 설계와는 달리 R과 C외에도 L의 영향을 반드시 고려해 주어야 한다. 또 하나의 방법으로는 EM시뮬레이션에 기반한 모델링 방식을 들 수 있다. 이 경우 각 연결선에 대해 독립적인 시뮬레이션을 수행하여 이를 최종 회로시뮬레이션에 개별적으로 삽입하는 방법과 모든 연결선을 회로 레이아웃 상의 상대적 위치를 보존한 상태에서 동시에 시뮬레이션하는 방법 등이 있을 수 있다. 후자의 경우 계산 시간이 오래 걸리나 연결선 간의 상호 작용도 고려할 수 있다는 점에서 더 정확한 방식이라 할 수 있겠다. 어느 경우라도 역시 앞서 밝힌 바와 같이 시뮬레이션의 정확성을 점검하는 측면에서 두 개 이상의 시뮬

레이션 툴을 사용하여 그 결과 값을 교차 비교하는 것이 좋다. 집중소자 대신 전송선을 사용하는 경우 연결선 분석이 필요한 대상이 줄어들어다는 점에서 상대적인 장점이 있을 수 있다.

IV. 밀리미터파 회로 개발 현황

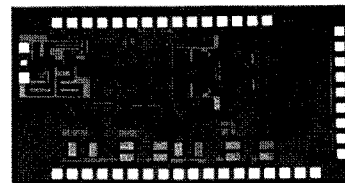
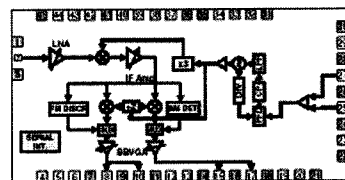
최근 밀리미터파 회로의 개발을 견인하는 주요 응용으로서는 60GHz대역 WPAN(wireless personal area network) 과 77GHz대역 자동차레이더를 들 수 있다. 이에 이들 응용을 중심으로 회로의 개발 현황을 간단히 살펴보기로 한다.

60GHz대역은 공기 중의 산소 분자 공진주파수와 일치하기 때문에 전자기와 신호의 공기 중 감쇠율이 매우 높은 주파수 대역이다(약 10dB/km). 이에 60GHz를 전후한 대역은 비허가 대역으로서 남아 있었는데, 이 대역을 WPAN에 응용하고자 하는 노력이 최근 들어 급속히 증가하고 있다. 신호의 높은 공기 중 감쇠도는 장거리 무선 통신 시스템에의 응용에 있어서는 큰 결격사유로 작용하지만, 10m 가량의 좁은 개인 공간을 대상으로 하는 WPAN시스템에 있어서는 타 채널과의 간섭 감소 등의 이유로 인해 오히려 장점으로 작용을 하게 된다. 이 대역의 충분한 대역폭을 사용하게 되면 수 Gbps급의 높은 데이터 전송 속도의 시스템을 구현할 수 있을 것으로 예상되는데, 이는 고화질의 비디오 데이터 전송이 필요한 가전 및 의료기기를 비롯한 다양한 무선 고속 전송 시스템에 적용될 것으로 예측되고 있다. 이 같은 전망으로 인해 최근 들어 국내외 여러 기업들이 이 대역의 응용에 관심을 보이고 있으며, 표준화에 있어서도 진전이 있

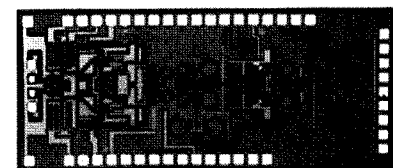
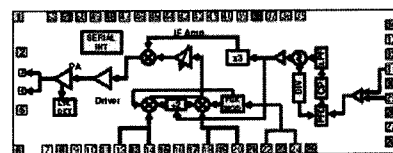
어 관련 IEEE 802.15.3c 표준의 경우 최근 단일 표준화에 대한 합의가 이루어진 상황이다¹³⁾.

이에 따라 이들 시스템에의 응용을 위한 60 GHz대역 밀리미터파 회로 관련 연구가 최근 들어 높은 활기를 띠고 있다. 최근 진행되는 이들 회로들에 대한 연구는 대부분 실리콘 소자기술에 기반하고 있는데, 이는 이 기술의 응용이 대량생산을 전제로 한 상용제품에 있기 때문인 것으로 분석된다. 주로 개발이 이루어지는 회로는 60GHz송수신단에 적용되는 저잡음증폭기(LNA), 전압조정발진기(VCO : voltage-controlled oscillator), 혼합기(mixer), 전력증폭기

RX



TX



〈그림 3〉 IBM의 SiGe HBT 60GHz 수신기 및 송신기

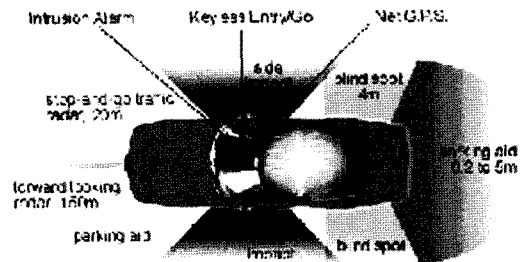
(PA : power amplifier) 및 이들을 집적한 송신기 혹은 수신기 모듈이다. 현재 시점에서 볼 때 SiGe HBT기술에 기반한 회로들은 이미 상당한 수준의 완성도를 보이고 있으며, Si CMOS 기술에 기반한 회로들도 최근 들어 활발한 연구를 통해 큰 성능 향상을 보이고 있다.

개발된 회로의 한 예로서 그림 3에 보인 바와 같이 IBM에서 개발된 60GHz송신단 및 수신단 회로를 살펴보자^[2]. 이들 회로는 57-64GHz의 RF신호 및 8.1-9.1GHz의 IF신호를 지원하며, LNA, mixer, PA, PLL등의 단위회로로 구성되어 있다. 15.3GHz-18 GHz주파수 범위를 가지는 PLL출력은 3배 채배되어 RF의 LO를 제공하고, 2배 분할되어 IF의 LO를 제공하도록 설계되어 있다. 수신단은 60GHz근방에서 최고 72dB의 이득 및 6dB전후의 잡음특성을 보이며, 송신단은 이 주파수 대역에서 약 15dB까지의 출력을 보이는 것으로 보고되고 있다.

자동차레이더 시스템은 충돌경고 및 완화, 사각지대 모니터링, 주차 도움, 차선 변경 경고 등의 기능을 제공하는 장치로서(그림 4), 이미 고가의 차량에 대해서는 옵션 항목으로 제공되고 있다. 이 시스템은 하나의 장거리 레이더(LRR: long range radar)와 여러 개의 단거리 레이더(SRR: short range radar)로 구성되어 있는 경우가 일반적이며 현재 LRR은 77GHz대역, SRR는 24GHz의 주파수를 사용한다. 그러나 유럽의 경우 주파수 분배의 문제로 인하여 2013년 7월 이후부터는 SRR에 24GHz 주파수를 적용하지 못하며, 이 시점 이후 출고되는 차량의 SRR은 모두 79GHz주파수를 사용하도록 계획되어 있다^[3]. 따라서 77-79GHz의 밀리미터 대역을 사용하는 자동차레이더 수요는 급격히 증가할 것으로 예상된다. 이 대

역 자동차 레이더의 상용제품은 주로 GaAs 등 화합물반도체 소자기술에 기반한 제품이 주종을 이루어 왔으나 최근 실리콘 소자기술, 특히 SiGe HBT에 기반한 제품개발에 대한 관심이 고조되고 있다. 자동차레이더 시스템에도 일반 통신 송수신단과 같이 LNA, VCO, mixer, PA와 같은 회로들이 주요 기능을 담당하고 있으며, 이들 개별 회로 및 집적 모듈에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[4]. 일반 통신 시스템과의 차이를 든다면 기본적으로 레이더 시스템이므로 송신단에서 방출되는 신호가 변조된 데이터 신호를 포함하지 않으며, 수신단은 대상 물체에서 반사된 송신 신호를 처리한다는 점이라 할 수 있겠다.

이와 같은 60GHz 및 77GHz대역 외에도 94GHz대역에서는 대테러 안전보장 기능에 사용될 수 있는 영상 시스템, 항공관제 시스템, 기후관측 시스템에 대한 응용이 있으며 이 대역을 활용하고자 하는 다양한 회로 연구가 이루어지고 있다^[5]. 100GHz이상으로 올라가면 140GHz, 220GHz 등의 대역도 94GHz대역과 마찬가지로 공기 중 전파 감쇠가 주위 대역에 비해 상대적으로 작아 대기창(atmospheric



〈그림 4〉 자동차레이더의 다양한 기능
(Courtesy of M/A Com)

window) 라고 불리는데, 이들 주파수 대역에서의 응용을 염두에 둔 밀리미터파 회로 연구도 점차 증가하고 있다⁶⁾. 이들과 같이 밀리미터파 대역 중에서도 높은 주파수 영역에서 동작하는 회로는 아직까지 화합물반도체 소자기술에 주로 기반하고 있으나, 최근 들어서는 수백 GHz대역에서 동작하는 실리콘 소자기술 기반 회로들도 발표되고 있어⁷⁾, 실리콘 기반 회로 적용이 가능한 주파수 대역 확대 기세는 당분간 지속될 것으로 보인다.

V. 맺는말

이상으로 밀리미터파 회로 개발과 관련, 적용될 수 있는 여러 가지 소자기술을 비교 분석하고, 회로 설계에 있어서의 난점에 대한 부분적인 해결책을 제시하였으며, 현재의 개발 현황에 대해 알아보았다. 본문에 기술한 내용 외에도 밀리미터파 회로 개발에 있어서는 측정의 신뢰성 향상 등 갖가지 산재한 문제들이 있다. 그러나 이들에 대한 해결책들이 꾸준히 제시되고 있을 뿐 아니라, 앞으로 관련 시장 규모가 지속적으로 확대되고 신형 시장도 등장할 것으로 예견되기 때문에, 이 분야에 대한 연구 및 개발은 계속하여 증가세를 띠 것으로 예상된다. 아쉽게도 이 분야의 국내 기술은 아직 국제적 선두 그룹과 격차가 있는 것으로 판단된다. 따라서 관련 시장이 무르익었을 시점에서의 국외 기술 종속을 방지하려면 국내 기술의 개발에도 시급히 활발한 투자가 이루어져야 할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3c.html>.
- [2] S. Reynolds, A. Valdes-Garcia, B. Floyd, T. Beukema, B. Gaucher, D. Liu, N. Hoivik, and B. Orner, "Second Generation 60-GHz Transceiver Chipset Supporting Multiple Modulations at Gb/s data rates," in *IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*, pp. 192-197, 2007.
- [3] K. M. Strohm, R. Schneider, and J. Wenger, "KOKON: A joint project for the development of 79 GHz automotive radar sensors," in *International Radar Symposium*, pp. 97-101, 2005.
- [4] H. Knapp, B. Dehlink, H. P. Forstner, E. Kolmhofer, K. Aufinger, J. Bock, and T. F. Meister, "SiGe Circuits for Automotive Radar," in *2007 Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems*, pp. 231-236, 2007.
- [5] S. C. Kim, D. An, B. O. Lim, T. J. Baek, D. H. Shin, and J. K. Rhee, "High-performance 94-GHz single balanced mixer using 70-nm MHEMTs and surface micromachined technology," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 27, no. 1, pp. 28-30, 2006.
- [6] A. Tessmann, "220-GHz metamorphic HEMT amplifier MMICs for high-resolution imaging applications," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 40, no. 10, pp. 2070-2076, 2005.
- [7] R. Wanner, R. Lachner, G. R. Olbrich, and P. Russer, "A SiGe Monolithically Integrated 278 GHz Push-Push Oscillator," in *IEEE International Microwave Symposium*, pp. 333-336, 2007.

저자소개



이재성

1991년 2월 서울대학교 전자공학과 학사
1995년 2월 서울대학교 전자공학과 석사
1999년 11월 Univ. of Michigan EECS 박사
1999년-2004년 IBM Semiconductor R&D
Center
2004년-현재 고려대학교 전기전자전파 공학부
(現 부교수)

주관심 분야 : 밀리미터파 소자 및 회로