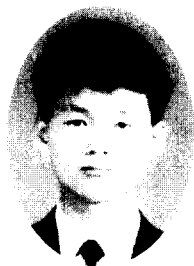


초전도체를 이용한 통신 소자 개발 현황 및 향후 동향



한 병 성
전북대학교 전기공학과 교수



정 동 철
전북대학교 공과대학 대학원 전기공학과 재학(1998)
(박사과정)

I. 서 론

초전도체를 통신소자에 응용하려는 시도는 세라믹계 고온초전도체의 발견 이전부터 제기되어 왔다. 초전도체를 이용한 통신소자의 응용은 기존의 일반 전도체를

기반으로 하는 통신 소자에 비하여 낮은 전력 소모, 높은 수신 감도, 빠른 스위칭 시간, 그리고 신호의 찌그러짐이 매우 작다는 장점[1]을 가질 수 있기 때문이다. 그러나 니오븀이나 납 또는 이들의 합금으로 이루어진 저온초전도체를 이용한 통신 소자를 구현하려는 노력은 가격대나 성능면에서 고가의 헬륨 및 부대 냉각 장치를 필요로 한다는 점에서 구현된 소자의 상업화에 매우 부정적이었다. 역시 이들 저온초전도체로 제작된 통신소자의 성능 또한 구리나 금 등을 이용한 일반 전도체 통신소자에 비하여 기대에 미치지 못하는 수준이었다. 따라서 이러한 저온초전도 통신소자의 응용은 제조 단가를 어느 정도 무시할 수 있는 그러면서도 고도의 정밀성과 고효율성이 요구되는 군사무기체계나 우주항공산업 등과 같은 특별한 분야에서 그 가능성이 조심스럽게 점쳐지곤 하였다.

현재, YBCO계열을 중심으로 하는 고온초전도체 기반 통신소자 개발 붐은 전적으로 이들 세라믹계 초전도체의 임계온도 상승에 기인한 것이다. 절대 온도 100 K를 능가하는 임계온도의 상승이 누차 알려진 바와 같이 냉각 수단에서 냉매의 역할을 고가의 액체 헬륨에서 상대적으로 가격이 수백 배 저렴한 액체 질소로 바꿀 수 있는 가능성을 제공하였기 때문이

낮은 제조 단가와 좀더 단순한 제조 설비의 사용이 가능해졌다. 무엇보다도 초전도 특성 관찰이 저온초전도체에 비하여 매우 저렴한 상황에서 행하여질 수 있다는 점에서 대학의 실험실이나 소규모의 연구단위에서 손쉽게 접근할 수 있는 용이점을 제공한다. 세라믹계 고온초전도체 통신 소자의 개발은 1993년 미국에서 수행된 HTSSE-I (High Temperature Superconductivity Space Experiment) 과제로부터 시작되었다고 해도 틀린 말은 아니다. 이러한 연구과제의 목적은 고온초전도체를 이용한 마이크로파 소자들을 우주에서 위성통신용 소자로 사용하고자 함이다. 이러한 노력들은 1997년 HTSSE-II 연구과제의 수행을 통하여 실제 통신 시스템의 상용화 가능성이 점겨지기 되었다.

국내에서의 고온초전도체를 이용한 통신소자의 개발 또한 미국 등을 비롯한 여타의 국가에 비하여 짧지 않은 연구 기간을 가지고 있다. 1993년에 수행된 '고온초전도 고주파 소자의 설계 및 특성 평가 기술 연구'라는 연구 주제를 가지고 전자통신연구소[2], 과학기술연구원, 삼성종합기술연구원, 서강대학교, 전북대학교가 중심이 되어 고온초전도체의 마이크로파 특성 연구 및 통신소자 개발에 관다 더불어 이러한 고온초전도체는 기존의 저온초전도체에 비하여

한 연구를 수행한 바 있다.

현재, 고온초전도 통신 소자와 관련하여 보고되고 있는 연구개발 동향은 공진기[3,4] 필터[5,6,7], 안테나[8], 지연 초고주파 선로, 공진기, 듀플렉서 등 주요 수동 소자 중심으로 이루어지고 있으며 국내에서도 안테나와 필터, 공진기를 중심으로 다수의 연구 성과가 발표되고 있다. 특히 최근 고온초전도 박막 대면적화의 성공은 매우 특기할 만 하다. 이러한 박막의 대면적화(2 inch 웨이퍼)는 안테나나 필터의 결합소자로 사용되는 공진기 크기의 확대가 가능하기 때문이다. 기초 공진 소자인 공진기 크기의 확대는 곧바로 기존 고온초전도 수동 소자의 주파수 대역을 현재 활발히 상용화되고 있는 1.2 GHz 대역이나, 0.9 GHz 대역까지 내릴 수 있음을 의미한다. 현재 고온초전도 수동 소자의 동작 주파수가 Ku-Band에 머물러 있는 이유는 위성 통신 주파수라는 이유 이외에도 고온초전도 박막의 크기가 그 이상의 대역으로의 확대를 가로막는 결정적 요인이기 때문이다.

본 원고는 기존의 고온초전도

통신 소자 개발의 연구 성과를 소개하고 문제점 이에 따른 대책과 앞으로 동향에 대하여 점검할 것이다.

2. 초전도 통신소자의 연구개발 동향

1. 고온초전도 통신 소자 설계시 고려 사항

일반적으로 고온초전도 초고주파 소자 설계시 쉽게 저지르는 오류는 고온초전도체를 완전도체로 해석하는 경향이 그 첫 번째이고 경계조건을 표피효과에 의한 침투깊이로 고려하는 것이 두 번째이며 일반적인 초고주파 회로와는 달리, 기판이 매우 높은 유전률을 가지고 있다는 사실을 간과하는 것이 세 번째이다. 주지하다시피 초전도체는 완전도체가 아니며 초전도체에는 표피효과가 존재하지 않는다. 대신 온도변화를 함수 인자로 가지는 자계 침투 효과(penetration depth effect)가 존재하게 된다. 또한 보편적 초고주파 회로에서의 설계 조건은 유전률을 8 이상 고려하지 않고 있다는 사실에 유념해야한다. 더불어 주파수가 10 GHz 이상을 넘어설 경우 일반 전도체와 마찬가지로 초전도 통신

소자들도 초전도 소자 표면에 표면과 존재하게 된다. 흔히 사용되는 전송선로 모델의 경우 소자에 결합되는 공진기의 형태가 각각 마이크로스트립이 아닐 경우는 해석이 불가능하며 캐비티 모델 응용은 초전도 패치의 특성이 고려되기 매우 어렵다. 따라서 일반적인 고주파 선로를 규명하는 수식으로서의 설명이 곤란하다. 정확한 수치해석이 필요하며 보편적으로 모멘트법을 이용한 수치해석이나 유한 요소법 등이 초전도 통신 소자의 특성을 해석하는 데 즐겨 사용되고 있다.

2. 고온초전도 안테나

초전도 박막을 안테나에 응용하려던 시도는 일찌감치 저온초전도체 응용연구에서부터 존재하여왔다. 그러나 초전도 안테나의 경우 여타의 초전도 소자와는 달리 초전도체로부터 전자파를 외부로 방출해야 한다는 점이 이를 실현하기에 매우 어렵게 하는 요인이다. 필터 등 여타의 통신 소자는 전자파를 소자 내부에서 필터링하거나 공진시키는 구조를 가지고 있기 때문에 액체 질소나 액체 헬륨 등을 이용하여

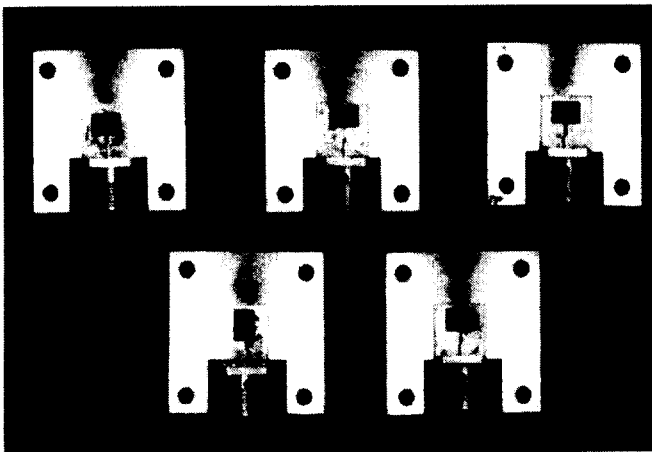


그림 1. 급전선을 달리한 고온초전도 마이크로스트립 안테나 (전북대 초전도 시스템 연구실 사진 제공)

초전도 상태를 이룬 다음 그 특성을 회로망 해석기 등을 이용하여 측정이 가능하다. 그러나 안테나의 경우 냉각 시스템 안에 마이크로파 특성 검출 소자(예를 들면 표준 혼 안테나와 같은)를 집어 넣거나 냉각 시스템 외부로 초전도 안테나에서 방출되는 전자파를 전자파 암실에서 측정해야만 한다. 마이크로파 특성 소자를 냉각 시스템 안에 삽입하는 전자의 경우 냉각 시스템이 상대적으로 안테나 크기에 비하여 수백배 이상 커지게 된다. 또한 냉각 시스템의 구조에 따라서는 시스템의 구성 재질이 전자파를 흡수 또는 방출하게 될 경우 사실상의 정확한 측정은 불가능하다. 냉각 시스템 외부에서 마이크로파 특성 검출기로 초전도 안테나로부터 방사되는 전자파를 측정할 경우 중요한 측정 착오는 초전도 방사패치로부터 방사되는 전자파가 냉각 시스템을 통과하는 동안의 산란 및 감쇄되므로 이를 최소화해야 한다는 점이다. 이 경우 방사되는 방향쪽으로 특수한 고밀도 플라스틱으로 제조된 레이돔을 이용하게 되는데 이때 레이돔을 씌웠을 때와 레이돔을 제거했을 때의 특성을 비교하여 측정 시 데이터 보정을 하게 된다. 그림. 1은 YBCO계 박막을 이용한 고온 초전도 안테나의 모형을 보여주고 있다.

그림. 2와 그림. 3은 각각 그림. 1과 같이 제작된 고온초전도 안테나의 전개 평면 방사 패턴과 자계 평면 방사 패턴의 모양을 보여주고 있다. 보편적으로 이론적으로 전개된 평면케적과 잘 일치하고 있지만 측면에서 이론값과 상당한 이탈을 보여주고 있다. 이러한 원인은 몇가지 추론이 가능한데 첫 번째는 초전도 방사 패치의 표면 전류 분포가 일반 금속을 위주로 하는 안테나에 비하여 다

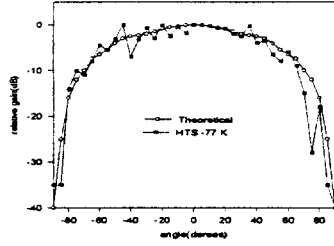


그림 2. 초전도 안테나로부터 방사되는 전개 평면 방사 패턴

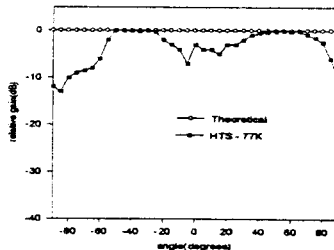


그림 3. 고온초전도 안테나로부터 방사되는 자계 평면 방사 패턴

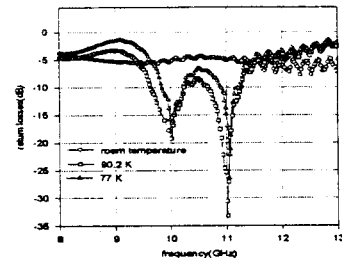


그림 4. 고온초전도 안테나의 반사 소실

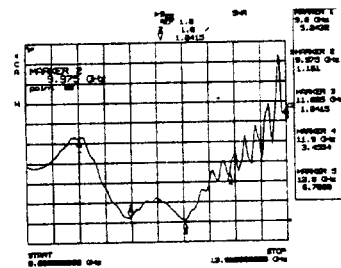


그림 5. 고온초전도 안테나의 정재파비

르다는 가 설을 세울 수 있다. 두 번째는 측정시의 안테나 각도가 피 측정 안테나와 정확한 일치율이 이루고 있지 않을 수 있는 이른바 측정 오차로 생각할 수 있다. 대부분의 보고에서 이를 측정오차로 보고하고 있지만 정확한 분석이 요구되는 부분이다. 특히 자계성분의 경우는 -60 도 이하 영역과 0 도 부근 그리고 90 도 부근에서 이론 값과 심각한 이탈을 보여주고 있다. 그림. 4는 본 연구팀에서 제작된 초전도 안테나의 반사 손실을 보여주고 있다. 반사 손실은 공작 주파수 11.02 GHz에서 -35 dB를 나타내고 있다. 보편적으로 일반 안테나 설계시 상업적으로 매우 우수한 정합의 기준을 25 dB로 잡는 것을 고려한다면 이러한 결과치는 상대적으로 우수한 초전도 특성을 나타낸다고 판단된다. 그림. 5는 초고주파 시스템의 성능을 좌우하는 전압 정재파비(VSWR)로 공진주파수 11.02 GHz에서 1.04로서 매우 이상적인 상태를 보여주고 있다.

3. 고온초전도 대역 통과 필터

고온초전도체 통신 소자 응용 중 가장 활발한 연구 성과를 보여주고 있는 분야는 고온초전도 박막을 이용한 공진기 및 이를 기반으로 하는 1/4 파장 공진기 결합형 대역 통과 필터 분야이다. 필터는 안테나와 같은 1 단자 소자와는 달리 2 단자 소자로서 소자에 여기되는 전자파를 적절하게 필터링하는 기구이며 낮은 삽입 손실로 높은 신호 복원력 그리고 역시 낮은 신호의 찌그러짐이 요구되는 소자이다.

2 단자 소자인 대역통과 필터가 1 단자 소자인 안테나에 비하여 연구가 활발한 이유는 다음과 같은 사실에 기인한다. 첫 번째, 전자파가 외부로 방사되는 안테나

와는 달리 기구 내부에서 여기되는 전자파를 필터링하는 소자 구조를 가지고 있기 때문에 측정이 용이하다. 매우 rough한 측정의 경우는 곧바로 액체 질소 안에 2단자 필터를 채우고 특성 측정이 가능하다는 점이 매력적이다. 두 번째 이유는 후에 논의하게 될 패키징 문제에 있어서도 소자 외부의 전자장 방사를 고려하지 않아도 된다는 소자 기능 상의 장점이 있다. 이러한 이유들로 인하여 고온초전도 대역통과 필터는 여타의 다른 초전도 통신소자에 비하여 가장 먼저 상업화가 점쳐지는 분야이기도 하다.

그림. 6은 본 연구팀에서 제작한 고온초전도 대역통과 필터의 형상을 보여주고 있다. 이러한 필터들은

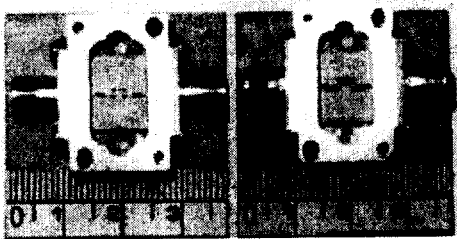


그림 6. 임피던스 비를 달리한 고온초전도 대역 통과 필터(전북대학교 초전도 시스템 연구실 사진 제공)

기존의 공진기 병렬 결합 방식과는 달리 공진기의 임피던스비를 다르게 하여 필터 구조를 훨씬 축소할 수 있다는 장점이 있다. 그림. 7과 그림. 8은 액체 질소 온도와 상온에서의 삽입 손실과 반사 손실을 나타내고 있으며 여기에 따른 각종 특성을 표. 1에 정리하였다.

3. 초전도 통신 소자 연구개발 현황의 문제점 및 앞으로의 전망

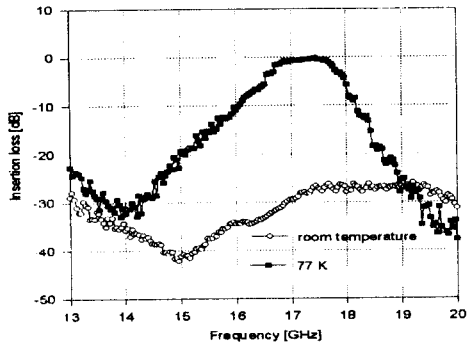


그림 7. 77 K와 상온에서 고온초전도 대역 통과 필터의 삽입손실

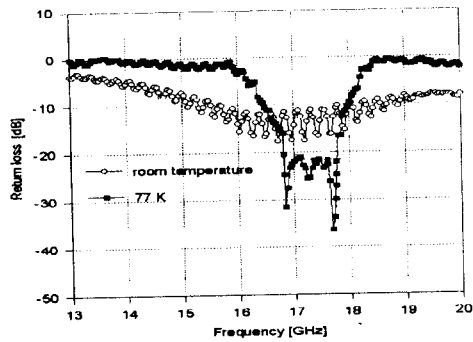


그림 8. 77 K와 상온에서의 고온초전도 대역통과 필터의 반사 손실

표. 1 고온초전도 초고주파 대역통과 필터와 비교용 금 필터의 특성

	HTS filter	Gold filter
center frequency	17.22 GHz	17.27 GHz
3 dB bandwidth	16.68 ~ 17.76 GHz (1080 MHz)	16.64 ~ 17.86 GHz (1220 MHz)
insertion loss	< - 0.24 dB	< - 1.74 dB
return loss	> - 22.92 dB	> -19.91 dB

1. 연구개발 현황의 문제점

1-1 고온초전도 박막

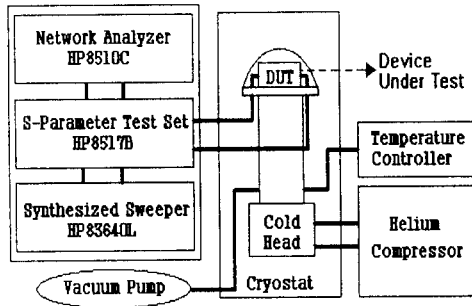


그림 9. 초전도 통신 소자 측정 시스템

고온초전도 박막을 제조하기 위한 장치로서 사용되는 방법은 rf-on axis 또는 off axis sputtering 법, CVD 법, 펄스 레이저 증착법, MOCVD 법 등이 이용되고 있으며 국내의 경우 rf-sputtering 법이나 CVD 법, 펄스 레이저 증착법 등이 주류를 이룬다. 그러나 이중 rf-on axis sputtering[9] 법은 초전도 입자의 역 sputtering으로 인해 에너지를 가지고 이온화된 입자들의 충돌과 이로 인한 박막 조성상의 파괴로 인해 사실상 박막의 조성비를 맞추는 일이 매우 어렵다. 따라서 이러한 어려움을 피하기 위해 off axis 방법[10]이 사용되지만 이럴 경우 박막을 제조하는데 드는 시간이 매우 크다는 단점 역시 내포하고 있다. 현재 안정된 박막조성을 위해서 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 방법은 펄스 레이저 증착법[11]이다.

두 번째로 짚고 넘어가야 할 부분은 박막 크기의 제한이다. 국내 박막 제조 기술 수준은 주로 1 cm × 1 cm 기판 수준이 주류를 이루고 있었으며 최근 LG 와 삼성 종합 기술원에서 각각 2 inch 와 1 inch 박막의 제조에 성공하였다는 보고가 있다. 고온초전도

박막 크기의 확대는 곧바로 초전도 통신 소자의 주파수 대역을 상용 주파수 대역인 1 GHz 미만으로 내릴 수 있음을 의미한다. 현재 2 inch 고온초전도 박막의 크기로는 PCS 주파수 대역인 1.2 GHz 대역까지 통신소자의 설계가 가능하다. 세 번째 문제점은 제조되는 초전도 박막의 안정성 문제이다. 일반적으로 제조되고 있는 YBCO 계 초전도 박막은 안정성 면에서 매우 취약하다. 공기 중의 산소와 쉽게 반응하여 대략 1~2 년 정도면 조성비가 열화되어 초전도성을 잃게 된다. 이러한 특성은 상업화 가능성에 어두운 그림자를 드리우게 하는 면이 아닐 수 없다.

1-2 초전도 소자의 패키징 기술

현재까지 초전도 통신소자를 포함하여 모든 고온초전도 전자소자들은 이상스러운 만큼 초전도 소자의 상업화에 대비한 패키징에 무방비 상태로 대처해왔다고 해도 과언은 아니다. 실제로 현재 측정 시스템에 사용되는 cryocooler 들은 소자의 크기에 비하여 수십배 내지는 수백배의 크기를 가지고 있다. 초전도 통신소자가 아무리 뛰어난 성능을 가

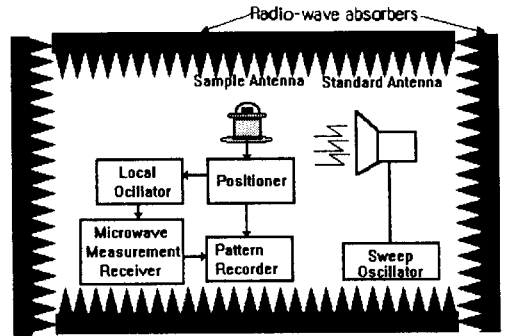


그림 10. 초전도 방사 소자 측정 시스템

지고 있다고 하더라도 이러한 거대한 냉각 패키징들로 인해 사용자들의 구매 욕구는 쉽게 사그러들 것이다. 고온초전도 박막의 대면적화 및 안정화와 더불어 냉각 패키징은 더 이상 미룰 수 없는 중요한 연구 과제를 절대로 잊어서는 안된다. 그림. 9와 그림. 10은 본 연구팀에서 사용중인 측정 시스템 및 패키징을 나타내고 있다.

1-3. 초전도 전자장 규명의 문제

지금까지 제작되고 있는 초전도 통신 소자의 설계는 두가지 방법에 기초를 둔다. 첫 번째는 이른바 두흐름 모델(Two Fluids Model)에 기반을 둔 전자장 이론을 바탕으로 한 설계 방법이다. 주지하다시피 두흐름 모델은 초전도체 내에서 전류의 수송을 담당하는 캐리어들이 일반 전도전자와 쿠퍼쌍을 이루는 초전도 전자쌍이라는 가설이며 그 두 캐리어 사이에는 산란이 존재하지 않는다고 가정하였다. 그림. 11은 두 흐름 모델을 도식적으로 나타내었다. 실제로 이 모델은 저온초전도체의 전자장 해석을 규명하는데 대체적으로 일치함을 보여준다. 대부분의 연구자들은 이러한

두흐름 모델을 초전도 소자를 설계하는데 그대로 적용하는 오류를 범하고 있다. 그러나 이 모델은 고온초전도체의 전자장 해석을 해낼 수 없으며 그림 11에 보여지는 것처럼 고온초전도체 내의 캐리어들은 여전히 산란을 한다.

두 번째 방법은 전자장 수치해석용 캐드(CAD) 프로그램을 이용하는 방법이다. 그러나 이미 상용화되고 있는 많은 종류의 설계 프로그램들은 철저하게 일반 전도체를 기반으로 하는 전자장 모델에 근거하고 있다는 사실에 유의할 필요가 있으며 실제로 많은 부분에서 설계치와 일치하지 않는 점을 발견할 수 있다.

2. 앞으로의 전망

고온초전도 통신소자를 개발함에 있어서 선행되어야 할 과제는 위에서 언급한 세가지 문제점을 해결하는데서 출발한다. 무엇보다도 고온초전도상이 안정적이며 대면적이 되어야 할 것은 물론이고 상업화를 위해서는 반드시 패키징 기술이 뒤따라야 하며 정확한 전자장 해석이 이루어져야만 한다. 또한 산업 전반에 걸쳐서 반도체 소자의 중요성은 강조할 나위가 없다. 중요한 것은 마치 현존하는 반도체 소자를 모조리 초전도 소자로 대체하겠다는 무모한 생각보다 반도체 소자와 초전도 통신 소자를 적절하게 hybrid하는 방법이 모색되어야 한다는 점이다.

4. 결 론

본 고에서는 현재 고온초전도 통신 소자의 현황과 문제점 그리고 앞으로의 전망에 대하여 살펴 보았다. 고온초전도 통신 소자는 낮은 전력 소모, 높은 수신 감도, 빠른 스위칭 시간, 그리고 신호의

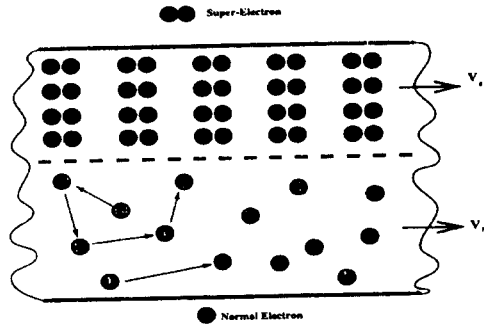


그림 11. 두흐름 모델의 시각적 도시

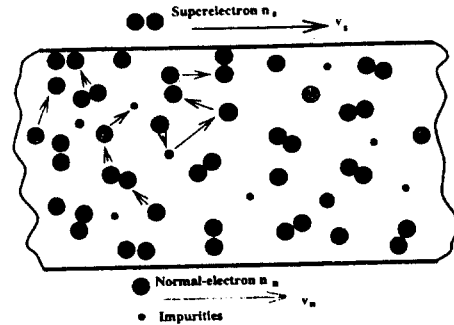


그림 12. 두흐름 모델의 산란 모형 도시

찌그러짐이 매우 작다는 장점을 가지고 있어 일찌감치 고 부가가치 산업으로의 성장 가능성을 보여준 바 있으며 전 세계적인 초전도 전자 소자 개발 열풍을 불러일으킨 바 있다. 현재의 단계에 있어서 이들 초전도 소자의 상업화가 이른 시간 내에 가능한가 하는 부정적 질문 또한 만만치 않았던 바 본 고에서는 현재 초전도 통신 소자의 연구 현황을 점검하고 앞으로의 전망에 대하여 기술하였다.

참 고 문 헌

[1] 전북대학교, 고온초전도 박막을 이용한 마이크로스트립 안테나 개발, 최종 보고서, April, 1997

- [2] 전자통신연구원, 고온초전도 마이크로스트립 필터 개발, 최종 보고서 April, 1997.
- [3] D. C. Chung, H. G. Kang and B. S. Han, "Fabrication of High Tc Superconducting Microstrip Resonator With High Q and Low Power dependence" Pro., of IEEE ICPADM, May, 1997, pp. 534-537.
- [4] S. Y. Lee, K. Y. Kang, S. K. Han and D. Ahn. "Fabrication of YBaCuO dual mode superconducting resonator for satellite communications," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 5(2), pp. 2567, 1995.

- [5] D. C. Chung, W. I. Huh and B. S. Han, "Realization of High Tc Superconducting Microstrip Filter for communication " *Pro. of IEEE ICPADM*, May, 1997, pp 585-588.
- [6] K. Y. Kang, S. Y. Lee, S. K. Han and D. Ahn "Microwave multipole lowpass and bandpass filters fabricated by High-Tc Superconducting thin films," *IEEE Trans. on Appl Supercond.*, vol. 5(2), 2567 1995.
- [7] D. C. Chung, K. K. Park, S. J. Park, B. S. Han, J. S. Hwang, S. H. Jung, K. Y. Song, "Comparison Between High-Tc Superconducting Microstrip Filters and Normal Conducting Counter parts" *IEEE Trans on Appl. Supercond.*, May 1999 will be published.
- [8] D. C. Chung, K. K. Park, B. S. Han, J. S. Hwang, "Ku-Band High-Tc Superconducting Microstrip Antenna Based on YBCO Thin Film" *IEEE Trans on Appl. Supercond.*, May 1999 will be published.
- [9] Y. K. Park, D. H. Ha, K. Park, and J.-C. Park, "Growth of a-axis oriented YBa₂Cu₃O_{7-x} thin films on LaSrBaO₄ and SrTiO₃ single crystal substrates by off-axis rf sputtering," *Physica C*, 235-240, 603-604 (1994).
- [10] B. H. Moeckly, S. E. Russek, D. K. Lathrop, R. A. Buhrman, J. Li and J. W. Mayeret, "Growth of YBaCuO thin films on MgO: The effect of substrate preparation" *Appl. Phys. Lett.* Vol. 57 PP.1687-1689.
- [11] S. G. Lee, D. S. Hwang, Y. K. Park and J. C. Park, "Deposition angle dependent morphology of laser deposited YBa₂Cu₃O₇ thin films", *Appl. Phys. Lett.* .65(6), 764-766, 1994.

< 이상렬 위원 >