

테마명	Ultimate 반도체 (극한 환경용 미래 반도체 소자)
관련기술 (파생기술)	박막 재료 성장 기술, 세라믹 재료 가공 기술, 외부 환경에 민감하지 않은 물질의 물성 제어 기술, 반도체 단결정/박막 성장·가공·도핑 기술, 반도체 신소재 미세 패터닝 기술, 반도체 생산 공정 및 모듈화 기술 등
미래사회상	(미래사회-1) 우주환경같은 극한환경에서도 안정적으로 구동하는 우주 반도체 소자를 구현하여 국제적 우주 리더십을 확보하는 사회

1	테마 정의	<p>□ 개념</p> <ul style="list-style-type: none"> - 극한환경¹⁾에서 안정적 활용 가능한 반도체 신소재²⁾의 고품질 제조 공정, 개발된 반도체 신소재와 적합성을 가지는 전극, 절연막 소재 및 공정 기술 및 이를 기반으로 반도체 소자³⁾, 논리게이트 등 구현 <p>1) 극한환경: 우주환경(진공, 절대 0도 근처의 극저온, 방사능 노출), 타행성에서의 환경(고압/초고압/초고자기장, 고정전기장, 대기 구성성분이 상이), 원전사고(고온/고자기장, 방사능 노출 환경) 등의 극단적 재난상황 등을 포함한 열적, 광학적, 물리적, 화학적으로 극단적인 환경으로 제안 과제에서 해결하고자 하는 극한환경을 자율적으로 정량적 수치와 함께 제시하며(복수로 제시), 이는 선정평가시 제안된 극한환경의 적합성 부분의 평가 대상이 됨.</p> <p>예시) 초고온 : 400K 이상, 고정전기장: 1400 MV/m 이상, 초고압 : 1TPa 이상, 방사능 : 100MeV 이상 등</p> <p>2) 반도체 신소재: 산화물 혹은 질화물 세라믹 기반 혹은 탄소 기반 신소재 등을 포함한 다양한 소재 중 열적, 기계적, 방사능 안정성 높은 물질에 전자 소자로서의 기능성을 부여. 전하 기반 소재가 아닌 다른 물성 변화 혹은 상전이 활용 가능.</p> <p>3) 반도체 소자: 다양한 물리적 원리 기반의 반도체 소자의 ON/OFF 구동, OFF 전류, 정적 전력소모 등의 제안된 극한환경 영향이 최소화된 구동이 가능. 전하 기반 소자 뿐 아니라 보다 안정한 입자/준입자 기반의 미래반도체 구현 등 신기술의 구체적 목표 특성을 포함해 자율적 제시. 특히 극한 환경에서도 활용 가능한 물성 변조로 인한 반도체 소재/소자 제시.</p> <p>□ 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> - (반도체 성장기술) 트랜지스터 소자의 경우 반도체 물질의 성장을 통한 고이동도 특성 확보 및 n형 및 p형 도핑 기술. 기타 원리의 반도체 소자의 경우 소자의 특성을 좌우할 물성에 대해 자율적으로 정량적 목표 제시. - (박막 공정기술) 전극 및 절연막 성장, 정밀한 두께 제어, 미세 패터닝 등 반도체 기능성을 부여할 수 있는 단위 공정 - (소자 공정기술) 상기 개발된 단위공정을 활용해 극한환경 적합한 반도체 기판 위에 적합한 패터닝 기술 기반 소자 제조 기술 (Inverter, Adder, 로직 게이트 등 다양한 소형 회로 중 4종 이상 자율적 제안)
----------	--------------	--

		<ul style="list-style-type: none"> - (극한 환경 구현 및 측정 기술) 지표면에서 극한 환경을 구현하여 반도체 구동 및 신뢰성 시험 및 공인된 결과 확보. 과제 제안시 적합한 정량적 평가 기술 제안과 확보 방안이 평가 대상이 됨. - 전하기반 소재/소자가 아닐 경우 그 새로운 물성에 따른 상응하는 기반 기술 제시 및 정량적 평가 방법 제시 필요 * 우주환경 (진공, 절대 0도 근처의 극저온, 방사능 노출), 타행성 (고압/초고압, 대기 구성성분이 상이), 원전사고 (고온, 방사능 노출 환경) 등의 극단적 재난 상황 등을 포함한 열적, 광학적, 물리적, 화학적으로 극단적인 환경 중 제안 과제에서 해결하고자 하는 극한환경에서 활용 가능한 반도체 기술에 대해 상기의 세부 기술을 반영하여 제안
2	도전성 혁신성	<p>□ 현재 기술적 한계점</p> <ul style="list-style-type: none"> - 현재의 반도체 기술은 상온, 상압의 일반적인 지표면 위의 환경에서 작동하는 소자를 기반으로 하며, 지표 위의 환경 변화에 따라 이러한 소자의 성능은 급격하게 저하됨. - 특히 트랜지스터는 Si (밴드갭=1.12 eV) 등 반도체의 작은 band gap을 활용, 전자의 열적 들뜸 분포를 제어하는 것이 가장 중요한데, 수십 도의 온도 변화만으로도 소자의 안정성은 급격하게 감소하게 되어 높은 열적 안정성을 가지는 반도체 소재 및 소자의 개발이 시급함. - 우주 환경에서는 total ionization dose, displacement damage, single-event effects 등 radiation damage에 의한 특성 열화에 취약하게 되어, 실제 우주 환경에서 활용되는 반도체의 경우 방사선에 대한 내성을 가진 소재들을 활용한 반도체 소재 개발이 요구됨. - 높은 자기장 환경에서는 로렌츠 힘의 존재로 전하 기반 소자의 사용이 어려우며, 특정 화학 물질에 대한 노출 등에 내성이 없는 등, 현재의 트랜지스터 소자는 지표면의 위의 일반적인 환경을 벗어난 극한 환경에서는 작동하지 않음. <p>□ 동 테마의 혁신성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 비관적으로 보아서는 기후위기와 재난, 긍정적으로 보아서는 우주 혹은 심해 탐사 등 지표면 위와 상이한 극한환경에서 작동하는 트랜지스터는 현재 전하 기반의 반도체를 활용하기에는 매우 어려울 수 있으며, 이러한 연구는 새로운 형태의 트랜지스터의 탄생과 활용을 낳을 수 있음. - 기존 트랜지스터가 단순 스칼라양인 물질의 전하농도를 전기장을 통해 제어하는데 그쳤다면, 새로운 트랜지스터는 새로운 벡터양을 전기장이 아닌 다른 변수를 통해 제어하는 완전히 새로운 개념의 소자가 될 수 있음.

<p style="text-align: center;">3</p>	<p style="text-align: center;">산업적 파급력</p>	<p>□ 신시장 창출 전망</p> <ul style="list-style-type: none"> - 극한환경 반도체 자체의 시장 규모를 알기 어려우나 관련 대표적 소재인 다이아몬드 반도체 기판의 경우 2022년 15억 USD 규모의 시장이며 2030년 40억 USD까지 성장이 기대되는 것으로 전망됨. (Virtue Market Research) - 다양한 극한환경 반도체가 있으나 그 중 대표적인 우주환경 반도체 시장의 경우 2022년 35억 USD 규모의 글로벌 시장이 있으며 2032년까지 59억 USD 규모의 성장이 기대되는 것으로 전망됨. (Precedence Research) <p>□ 예상 실현 시기</p> <ul style="list-style-type: none"> - 현재는 우주환경이 직접적으로 요구되는 우주선, 위성 등을 발사할 수 있는 기술을 가진 제한된 수의 국가들에 의해서만 주로 국가 차원에서 연구가 진행되어 시장이 제한적임. - Space X에서 진행하고 있는 상용화가 현재 공식적인 회사 목표에 따르면 2028년에 Starship space station이 시작되는 것으로 하고 있어, 낙관적으로는 2028년이 상용화 시장에 따른 시장이 의미있는 규모를 갖출 수 있는 시기가 될 것으로 추측됨.
<p style="text-align: center;">4</p>	<p style="text-align: center;">사회적 파급력</p>	<p>□ 해결 가능 사회적 이슈</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기후위기가 보다 현실화되었을 때, 이에 대한 근본적인 해결책이 되지 못하더라도 현재와 같은 인간의 삶을 지속가능하게 해 주어, 기후 위기의 해결에 필요한 시간을 연장할 수 있음. - 새로운 자원과 에너지 탐사를 가능케 하며, 지속가능한 에너지 보급을 해결할 수 있음. 현재 폭발적으로 증가하는 정보양에 따라 우주에 건설된 데이터 센터 등이 미래의 기술발전 방향으로 논의되고 있으며, 이러한 문제 해결에 기여할 것으로 기대됨. - 새로운 개념의 트랜지스터 소자는 에너지 효율을 비약적으로 높임으로써 자체적으로 현재의 에너지 소비를 감소시킬 여지가 있음. <p>□ 미래사회 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 우주 환경에서 작동하는 반도체 소자의 개발은 효과적 우주 및 항공 탐사를 가능케 함. 이는 스페이스 X 등의 기업에서 추진하고 있는 우주 기술의 상용화 등으로 인류의 삶은 윤택하게 할 수 있을 것으로 기대됨. - 인간이 직접 갈 수 없는 환경에서 작동하는 로봇 등을 제조할 수 있게 되어, 산업 자동화 및 로봇 공학 발전을 가져옴. - 고온 환경에서 작동하는 반도체 소자는 태양열 및 지열 발전을 보다 효과적으로 가능케 하며, 이는 에너지 산업 혁신을 가져올 수 있음.

5	글로벌 리더십	<p>□ 글로벌 경쟁국가 현황</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기본적으로 우주 등의 극한환경을 위한 기술개발을 하는 국가는 자체기술의 우주발사체를 보유한 국가들인 미국, 러시아, 영국, 프랑스, 중국, 일본, 인도, 이스라엘, 이란, 북한 등인 것으로 보임. - 우주 등의 극한 환경에 적합한 반도체 기술은 큰 밴드갭을 가진 SiC, GaN 등의 물질을 활용하는 전력반도체 기술과 크게 연관되어 있으며, 전력반도체 분야에서는 독일 Infineon, 미국 On semiconductor, 스위스 STMicro, 일본 Mitsubishi, 일본 Toshiba 등의 해외 업체들이 시장을 주도하는 상황으로 대한민국의 점유율은 미미함. <p>□ 글로벌 주도권 확보 분야</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대한민국은 현재 Si 기반의 메모리 반도체 분야에서 독보적인 지위를 가지고 있으며, 대한민국의 삼성전자 및 하이닉스가 전체의 DRAM과 Flash에서 약 70 %, 50 %의 점유율을 가지고 있음. (Statista) - 대한민국은 반도체 파운드리 시장에서 삼성전자가 세계 2위이나 점유율은 15% 내외로 독보적인 1위인 대만 TSMC에 많이 뒤쳐져 있는 상황임. 하지만, GAA 기술을 최초 도입하는 등 기술적 측면에서 최고 수준을 확보하고 있음.
6	기술적 차별성	<p>□ 국내외 연구동향</p> <ul style="list-style-type: none"> - 일본 National Institute of Materials Science에서는 2022년 다이아몬드 단결정 기판위에 BN 게이트 절연막을 활용해 p-channel 트랜지스터를 제작하고 680 cm²V-1s-1의 홀 이동도 성능을 보고함. (Nature Electronics 5, 37, 2022) - 중국 Chinese Academy of Sciences에서는 2017년 이트륨 도핑된 산화 하프늄 강유전체가 60Co 감마선에 12.96 total dose에 노출되었을 때에도 특성 열화가 없다는 것을 보고함. (IEEE Electron Device Letters 38(3), 330, 2017) - 미국 MIT에서는 2022년 큐빅 구조의 BAs에서 cm²V-1s-1의 홀 이동도 성능을 보고함. (Science 377(6604), 437, 2022) - 일본 Osaka City University에서는 2021년 GaN을 다이아몬드 위에 interlayer 없이 성장시키는 기술을 기반으로 섭씨 1,000도 이상에서도 동작할 수 있는 초고온용 반도체 기술을 보고함. (Advanced Materials 33, 2104564, 2021) - 일본 Hokkaido University에서는 2021년 hydrogen- terminated diamond를 활용하여 제작한 field effect transistors가 1 MGy의 x-ray 방사 이후에도 안정적으로 작동함을 보고함. (Applied Physics Letters 118, 162105, 2021) - 미국 University of Illinois Urbana-Champaign에서는 2023년 p-type diamond 기판을 사용한 Schottky barrier diodes를 제작하고 Schottky cathode에 Al₂O₃ field plates를 추가했을 때 파괴 전압이 1159 V에서 4612 V로 증가하는 결과를 보고함. (IEEE Electron Device Letters 44(10), 1692, 2023) - 한국 성균관대학교와 카이스트에서는 2016년 WSe₂를 활용한 vertical

graphene-TMD (transition metal dichalcogenides) heterojunction transistor을 제작하고 섭씨 -90 도의 온도에서 누설 전류가 감소하고 동작 전류가 증가하여 On/Off ratio가 5×10^7 으로 커지는 특성을 보고함. (Advanced Materials 28, 5293, 2016)

- 한국 Korea Institute of Science and Technology (KIST)에서는 2020년 5-50 nm 그래핀을 <110> polycrystalline diamond에 수직 구조로 성장시켜 diamond의 결정성 저하를 억제함과 동시에 diamond의 band gap 을 조절하는 차세대 반도체 기술을 보고함. (Materials Horizons 7.2, 2020)

□ 독립된 기술적 가치(삼극 특허, 특허 인용 네트워크 등)

- 최근 5년간 극한 환경용 반도체 관련 국내, 미국 및 유럽 특허를 조사 분석한 결과, 국내는 전체 170여건, 미국은 12,400여건 및 유럽은 1,000여건이 각각 검색되어 미국이 압도적인 우위를 가지고 있음
- 각 특허들의 기술적 특성은 극한 환경에 동작 가능한 반도체 또는 트랜지스터 제조를 위한 장비 또는 장비 지원을 위한 장치들이 주를 이루고 있으며, 반도체 소자 자체의 특성을 나타내는 특허는 상대적으로 낮음
- 국내는 매년 30여건 정도 특허 출원되고 있으며, 2021년도에 50여건으로 가장 높은 출원률을 나타내어 지속적으로 출원이 증가하고 있으며, 구체적인 기술적 내용은 제조 장치, 테스트 장치, 소자 구조 등이 주를 이루고 있고, 특히 양자 처리 요소, 위그너 결정 및 글로코오스를 이용한 새로운 소자 특허가 공개되었음
- 미국은 매년 2,000여건 이상이 출원되고 있으며, 역시 2021년도가 2,800여건으로 가장 높은 출원률을 나타내어 지속적으로 출원이 증가하고 있으며, 출원인은 세미컨덕터 에너지 레보라터리, 인텔, 마이크론 테크놀로지 등의 기업들의 주를 이루고 있음
- 또한, 미국 출원은 미국 기업 이외에 국내 기업, 대만 기업, 일본 기업 및 중국 기업들도 출원되었으며, 특히 일본의 경우에는 반도체 제조용 장비 업체들의 출원이 주를 이루고 있으며, 대만 역시 관련 장비 분야에서 활발한 출원이 이루어지고 있음
- 유럽은 매년 200여건의 일정한 출원이 진행되었으며, 유럽 기업, 미국 기업, 일본 기업, 대만 기업, 중국 기업 및 국내 기업들과 같이 다양한 나라에서 다양한 기술 분야로 출원되었으나, 미국이 비하여 상대적으로 낮은 출원 경향을 나타내어, 극한 환경용 반도체 분야는 미국이 시장과 기술을 주도하고 있음
- 한편, 종래기술들은 고온 환경, 방사능 노출 환경, 저온 환경 등에서 사용되는 반도체에 관한 기술이며, 주로 반도체 소자 손상을 최소화하는 방식으로 구현되는 것을 특징으로 하나, 본 테마는 우주 환경과 같이 극도로 열악한 환경에서 구동되며, 기존에 사용되지 않는 새로운 소재 또는 새로운 조합 소재를 이용한 반도체에 관한 것으로, 적용되는 구체적인 환경과 소자 재료에서 종래기술들과 구별됨

□ 기존 정부 R&D 와의 차별성

- 최근 5년간에 이루어진 정보 과제를 대상으로, 본 테마 기술을 기초로 검색한 결과를 검토한 결과, 기존 과제들에서 한정하는 극한 조건은 고온 환경, 고온/고전압/고에너지입자 환경, 방사성 환경, 고온/고습 환경 및 극저온 환경을 대상으로 하고 있음. 또한, 대상이 되는 반도체 종류는 산화갈륨 전력 반도체, 실리콘 기반 반도체, 산화물 박막트랜지스터 등이고, 소자 측면에는 플래시 메모리, 메모리 및 각종 센서를 대상으로 하고 있음
- 반면 본 테마는 우주 환경 등과 같이 기존 극한 환경에 비하여 더욱더 가혹한 환경을 대상으로 하여 구별되며, 또한 반도체 소재 역시 기존에 사용되는 소재와는 다른 소재 또는 기존 소재들을 다른 방식으로 처리한 것을 대상으로 하여 기존 정부 과제들과 차별되며 NTIS에서 검색된 과제중 정부출연금이 큰 대표적 과제와의 구체적 비교는 아래와 같음.
- **(9991008147)** 우주용 대용량 메모리 적층 패키징 기술 및 모듈 개발: 우주 환경에서 활용할 수 있는 반도체를 만드는 측면에서 유사성이 있으나 본 과제의 경우 기존 반도체를 활용하며 패키징 및 모듈 기술을 개발하는데에 목표가 있는 측면에서 본 제안 과제와 차이가 분명함.
- **(1711198404)** 8인치 SiC 웨이퍼 기반 멀티센서 SoC 플랫폼 개발: 비교적 큰 밴드갭을 활용할 수 있는 SiC 기반 system on chip을 개발한다는 측면에서 연관성이 있으나 소재가 SiC로 한정된 면에서 차이가 있음.
- **(1711188797)** 극한 환경 응용을 위한 미래반도체용 2인치급 단결정 다이아몬드 기판소재 성장기술 개발: 극한 환경에 적합한 소재 중 하나로 꼽히는 다이아몬드 기판의 개발이라는 측면에서 유사성이 있으나 본 과제의 경우 기판의 제조 기술에만 국한되는 차별점을 가지고 있음.
- **(1415181681)** 극한환경용 산화갈륨 자외선 센서 기술 개발: 극한환경 활용을 목표로 하며 산화갈륨이라는 전력반도체 소재를 활용한다는 측면에서 연관성이 있으나 자외선 센서 및 모듈 제작을 목표로 한다는 데에 본 제안 과제와 차이점이 분명함.
- **(1711178647)** 첨단소재 측정플랫폼 기반 구축: 초고온, 초고압 등 극한 환경에서 측정기술을 개발한다는 측면에서 본 제안 과제의 상보적 기술이 개발된 과제일 수 있으나 측정 기술의 개발에만 집중된 과제로 차이점이 뚜렷함.
- **(1711189506)** III-V족 화합물반도체 기반 우주용 태양전지 기반기술 연구: 비교적 큰 밴드갭을 가지는 III-V족 화합물반도체를 기반으로 우주에서 활용하는 소자를 개발하는 측면에서 연관성이 있으나 태양전지를 개발하는 것으로 본 과제의 반도체 개발과는 뚜렷한 차별성이 있음.