

산학연 연구실 소개 (1)

서울대학교 유기반도체연구실

(Organic Semiconductor Lab.)

서울 관악구 대학동 서울대학교 104-1동 509호 (우: 151-744)

전 화 : 02-880-9559, Fax: 02-872-6451

E-mail : chlee7@snu.ac.kr, Homepage: <http://oled.snu.ac.kr/>

연구책임자 | 이창희
서울대학교
전자정보공학부 교수

1. 설립 목적

유기반도체는 반도체로서의 전기적·광학적 특성과 유기물질의 장점을 같이 가지고 있는 새로운 반도체 재료로 활발히 연구되고 있다. 이 분야의 연구는 1970년대 후반에 발견된 전도성 고분자의 연구에서 출발하여 2000년에 노벨화학상을 수상하면서 중요성을 인정받았고, 유기발광다이오드 (OLED), 유기태양전지, 유기박막트랜지스터 (OTFT), 유기메모리소자 등 다양한 응용 분야로 확대되어 왔다. 이미 OLED 디스플레이는 휴대폰 등 모바일 제품에 활용되고 있으며, 55인치 AMOLED TV가 발표되었고, 플렉시블 디스플레이, 투명디스플레이 등 새로운 응용제품이 개발되어 가장 유망한 차세대 디스플레이로 주목받고 있다. 또한 OTFT와 유기태양전지도 성능이 빠르게 발전하고 있어서 곧 상용화가 될 것으로 예상되고 있다. 이와 같이 유기반도체 기반의 유기전자공학 (organic electronics)이 미래의 핵심 성장 산업이 될 것으로 예상되고 있다.

유기반도체 기반 광전자소자 연구에 주력하고 있는 본 연구실은 이창희 교수가 2004년 2월에 인하대학교 물리학과에서 서울대학교 전기공학부로 옮겨오면서 설립되어 유기반도체분야의 우수한 석박사 인력 양성과 세계 최고 수준의 원천기술 개발을 목표로 연구하고 있다. 특히 OLED, 양자점 발광다이오드(QD-LED), OTFT, 유기박막태양전지 연구에 주력하고 있으며, 박사 5명, 석사 23명을 배출하였고, 현재 박사 12명, 석사 6명을 지도하고 있다. 그리고 2008년에 국가지정연구실로 선정되어 나노복합구조 유기태양전지 연구를 진행하고 있으며, 2012년에는 지식경제부에서 선정한 유기 및 양자점 태양전지 GET-Future 연구실로 선정되어 세계 최고 수준의 차세대 박막태양전지 개발과 인력 양성에 노력하고 있다.

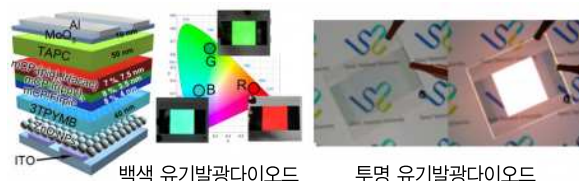
2. 연구 분야

유기반도체는 분자 설계 및 합성을 통해 전자에너지 구조와 에너지 밴드갭을 쉽게 조절할 수 있는 장점뿐만 아니라 용액 공정 등의 장점도 가지고 있는 차세대 반도체 재료이다. 특히 유기반도체소자는 무기반도체의 복잡하고 비싼 제조 공정 대신에 상온, 상압에서 인쇄공정으로 대면적·초저가 생산이 가능하고, 플라스틱 기판을 사용하여 유연한 전자회로를 구성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 유기반도체는 80년대 초반부터 본격적으로 연구가 시작되어 최근 OLED 디스플레이가 성공적으로 상용화되었고, 유기태양전지와 유기박막트랜지스터도 상용화 가능성을 보이고 있다. 본 연구실에서는 유기발광다이오드, 유기태양전지, 유기박막트랜지스터 분야

연구에 주력하고 있다. OLED 연구에서는 저전압·저전력 구동 OLED 소자, 고효율 백색 OLED 소자, 열화 원인 규명 및 수명향상 기술 등에 대한 연구를 폭넓게 진행해 왔으며, 양자점발광다이오드 연구에서는 새로운 소자 기술 개발에 집중하여 세계 최고 수준의 효율을 내는 적색, 녹색, 청색 및 백색 QD-LED를 개발했다. 그리고 최근에는 제3세대 태양전지인 유기 및 양자점 태양전지 연구에 박차를 가하고 있다.

2.1 유기발광다이오드

유기발광다이오드는 자체 발광, 고속응답, 광시야각, 초박형, 고화질 등의 장점을 갖추고 있어서 가장 이상적인 디스플레이 기술로 인정받고 있다. 본 연구실은 빛의 삼원색인 적색, 녹색, 청색에서 모두 우수한 발광 효율을 내는 OLED 소자 개발을 바탕으로 최근에는 효율과 수명이 높은 백색 OLED 개발에 중점을 두고 있다. 특히 다층 발광층을 가지는 백색 OLED 구조 중에서 수명 측면에서 유리한 청색 형광 발광층과 녹색/적색 인광 발광층을 적층하는 소자와 효율 측면에서 우수한 백색 인광 OLED 소자에 대해 집중적으로 연구하고 있다. 그리고 색순도, 전류 및 전압의 변화에 따른 색안정성 향상에 대한 연구와 새로운 화소형성 방법에 대한 연구를 진행하고 있다.

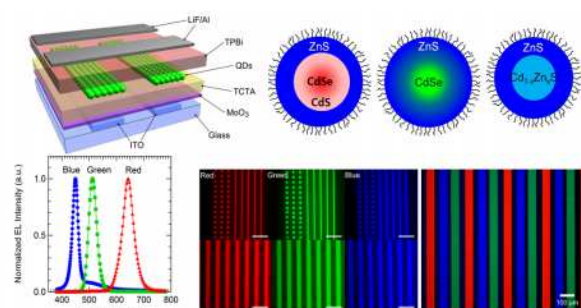


백색 유기발광다이오드

투명 유기발광다이오드

2.2 양자점 발광다이오드

양자점 발광다이오드(QD-LED)는 발광색을 쉽게 조절할 수 있고, 발광 선평이 좁아서 색순도가 높고, 발광효율이 높으며, 용액공정을 통해 낮은 비용으로 생산할 수 있는 장점을 가지고 있어서 차세대 디스플레이 및 조명 기술로 유망하다. 그런데 아직 효율과 수명 측면에서 OLED보다 낮은 문제점이 있다. 이 원인으로는 전극과 전하수송층에서 반도체 나노입자의 에너지 준위로 전하를 주입하는데 높은 에너지 장벽이 있어 전자와 홀 주입 효율이 낮기 때문이다. 또한 양자점이 균일하게 분포하는 다층 박막을 형성하기 어려워 누설전류가 큰 문제점이 있다. 본 연구실에서는 이런 문제점을 해결할 수 있는 세계 최고 효율의 적, 녹, 청색 QD-LED를 개발하여 반도체 양자점에 기반한 고효율·고휘도·고색순도의 차세대 디스플레이 및 백색광원 구현을 앞당겼다

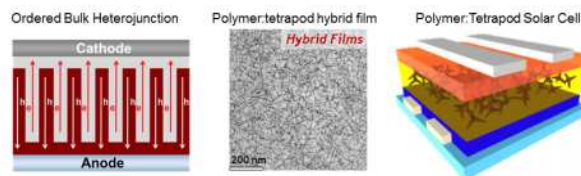


적색, 녹색, 청색 양자점 발광다이오드 구조, 발광스펙트럼 및 풀컬러 화소 패턴

(*Nano Lett.*, **12**, 2362 (2012)). ZnO 나노입자를 이용한 전자 주입층을 사용한 역구조 QD-LED를 제작하여 기존의 QD-LED의 최고 기록을 크게 뛰어넘는 최대휘도(적색: 23,000 nit, 녹색: 218,000 nit, 청색: 2,250 nit) 및 최대발광효율(적색: 7.3 %, 녹색: 5.8 %, 청색: 1.7 %)을 달성하였다. 이 성능은 형광색소를 사용하는 OLED 소자의 효율과 유사한 수준으로서, QD-LED 기술의 실용화 가능성을 한 단계 끌어올린 것으로 평가받고 있다. 또한 양자점과 전하수송성이 있는 고분자의 혼성 물질을 개발하여 양자점이 균일하게 분포하는 QD-LED를 개발하여 효율과 수명을 크게 향상시켰다. 그리고 풀컬러 QD-LED를 고해상도로 패터닝할 수 있는 방법을 개발하고 있다.

2.3 유기 및 양자점 태양전지

태양에너지를 전기에너지로 변환하는 태양전지는 에너지 및 환경 문제를 해결할 수 있는 에너지원으로써 활발하게 연구되고 있다. 그러나 아직 태양광발전 단가가 기존 에너지 단가에 비해 아주 비싸기 때문에 태양광발전이 전체 에너지 생산에서 차지하는 비중은 아주 작은 실정이다. 따라서 획기적인 저가 공정을 이용하면서도 효율을 높일 수 있는 대면적 박막 태양전지(제3세대 태양전지) 개발이 필요하다. 이런 측면에서 본 연구실은 유기 및 유기/나노입자 하이브리드 태양전지에 대한 연구에 집중하고 있고, 최근에 지식경제부에서 선정한 유기 및 양자점 태양전지 GET-Future 연구실로 선정되어 세계 최고 수준의 차세대 박막태양전지 개발과 인력 양성에 노력하고 있다. 본 연구실이 중점적으로 개발하고 있는 유기 및 양자점 태양전지는 대면적 플라



유기 및 양자점 탠덤 태양전지

스틱 기판에 프린팅 공정 또는 진공증착 방법을 통해 태양 전지를 제작할 수 있어서 다른 태양전지 기술보다 가격을 크게 낮출 수 있고, 유연성, 반투명성 등의 장점을 가지고 있어서 응용분야가 훨씬 넓을 것으로 기대되고 있다.

3. 주요 성과

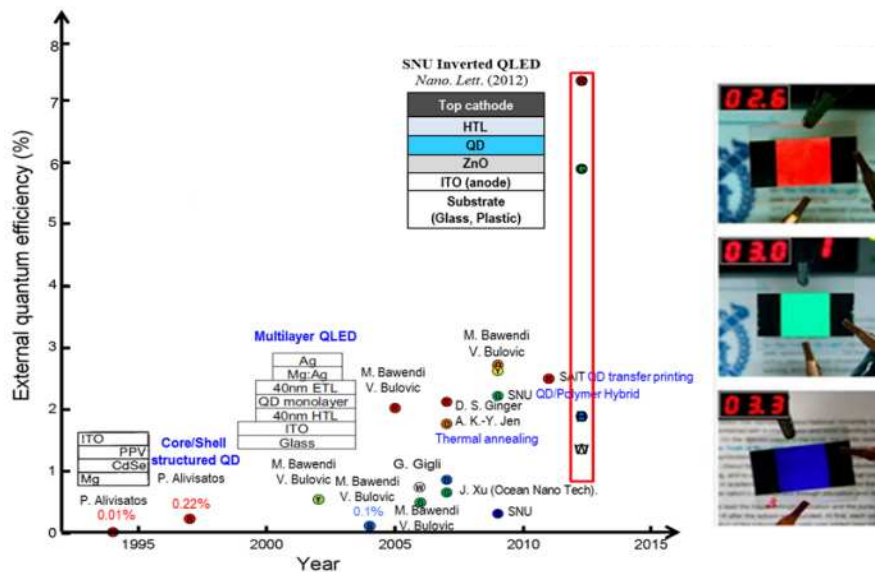
3.1 학술적 성과

본 연구실은 유기반도체의 전기적, 광학적 특성에 대한 깊은 이해를 바탕으로 OLED, 유기태양전지, 양자점 발광 다이오드 등 광전자소자 응용 연구에 집중하고 있다. 이를 통해 현재까지 약 150여편의 SCI논문 발표, 30여건의 국내외 특허 출원 등의 실적을 내고 있다. 특히 1995년에 LG화학기술연구원에서 OLED 디스플레이 연구과제를 시작한 이후 현재까지 지속적인 연구 및 인력양성을 통하여 국내 OLED 산업 발전에 기여하여 제2회 디스플레이날 공로상(2011년 10월)을 수상했다. 그리고 2003년 국제전기위원회(IEC) 평판디스플레이 부문 OLED 표준화분과 초대 의장으로 선출되어 OLED 용어정의, 일반규격, 광전자적 특성 평가, 환경내구성 평가 규격 등의 제정을 주도하여 IEC1906 Award (2007)를 수상했고, 2012년 7월에 개최된 OLED국제표준화 10주년 기념식에서 한국디스플레이산업협회로부터 공로상을 수상했다. 또한 OLED와 양자점 발광다이오드 핵심기술 개발을 통해 반도체 산업발전에 크게 기여한 공로를 인정받아 2012년 도연 창조상을 수상했다.

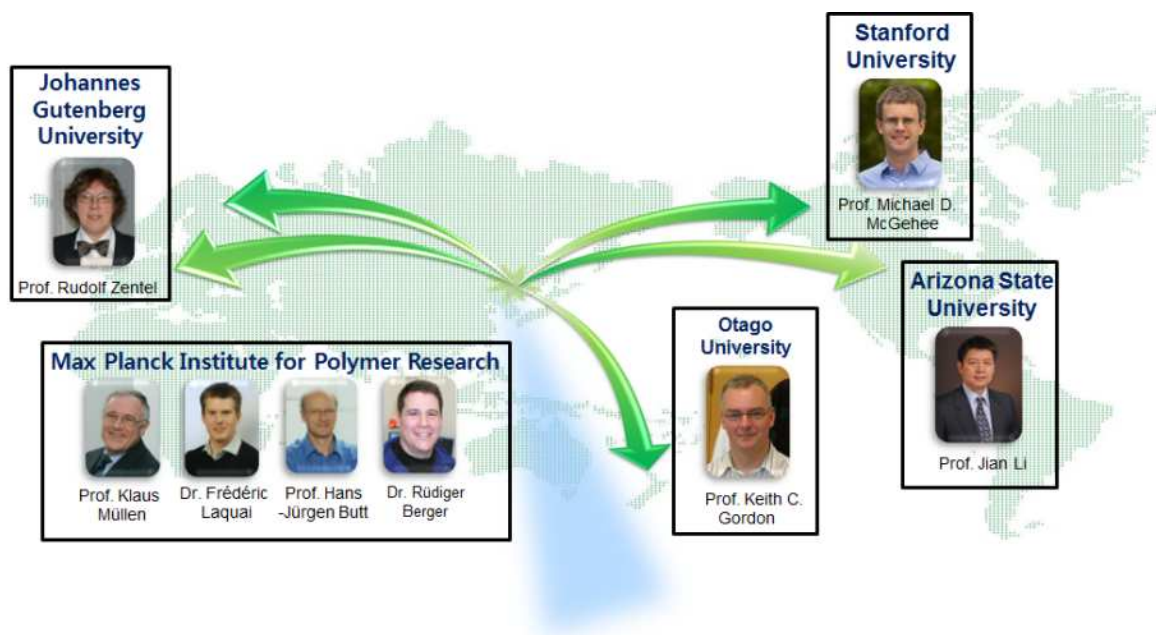
OLED 분야에 발표한 대표적인 논문으로는 안트라센 기반의 고효율 청색 형광 OLED 소자(*Adv. Mater.* **20**,

2720 (2008)), 세계 최고 효율의 적색 인광 OLED 소자(*Adv. Funct. Mater.*, **19**, 420 (2009)), 색안정성 및 효율이 향상된 백색 OLED 소자(*J. Appl. Phys.*, **103**, 124504 (2008)) 등을 발표했다. 또한 인광 OLED 소자의 발광층에서 전하 트랩 형성이 발광효율과 열화에 미치는 영향을 규명하였고(*Adv. Mater.*, **19**, 2061 (2007)), 고분자 박막에서의 전자와 홀 이동도의 온도, 전기장 의존성을 분석하였다(*J. Appl. Phys.*, **111**, 043710 (2012)). 또한 n-형 산화물 TFT로 구동하는데 적합한 역구조 OLED 소자를 개발하였다(*Appl. Phys. Lett.*, **96**, 153306 (2010)).

양자점 발광다이오드 분야에서는 서울대학교 화학생물공학부 차국현 교수, 화학부 이성훈 교수와 공동으로 세계 최고 효율의 녹색 양자점 LED를 개발했고(*Adv. Mater.*, **21**, 1690 (2009)), 이 결과는 *NPG Asia Materials*에 research highlight로 소개되었고 ["Green light for quantum dot LEDs", *NPG Asia Materials*, (2009. 4. 22)], 다수의 국내 언론에 소개되었다[중앙일보 (2009. 5. 12) 등]. 그리고 양자점을 한 층씩 정밀히 적층할 수 있는 기술을 개발하고, 이를 이용해 다양한 색의 QD-LED를 제작하고 발광스펙트럼을 분석하여 전자-홀 재결합이 양자점 다층 박막의 상부 1~2층에서 일어난다는 것을 최초로 규명했다(*Nano Lett.*, **10**, 2368 (2010)). 이 결과는 *MRS Bulletin*에 소개되었고 ["All-Quantum-Dot Multilayer LEDs Prepared Using Layer-by-Layer Solution Processing Show High Brightness", *MRS Bulletin*, **35**, 566 (2010)], 다수의 국내 언론에 소개되었다[연합뉴스 (2010. 10. 5) 등]. 또한 그 동안 양자점과 양극 사이에 존재하는 높은 에너지장벽으로 인



세계 최고 효율 양자점 발광다이오드 개발



해 홀 주입이 저해되어 발광효율이 떨어지는 문제점이 있었는데, ZnO 나노입자를 이용한 전자주입층을 사용하여 역구조 QD-LED를 제작하고, HOMO 준위가 높은 홀 전도 물질을 도입함으로써 홀 주입 문제를 해결하여 세계 최고 효율 및 최대 휘도의 적, 녹, 청색 QD-LED를 개발하였다 (*Nano Lett.*, **12**, 2362 (2012)). 이 연구결과는 QD-LED의 실용화 가능성을 한 단계 끌어올린 것으로 평가받고 있으며 Chemistry & Engineering News ["Quantum Dots Shine In LEDs", C&EN (2012. 4. 10)]와 국내 다수 언론에 보도되었다 [한겨레 (2012. 5. 1) 등].

본 연구실은 이처럼 다년간 축적된 유기발광다이오드 및 양자점 발광다이오드 기술을 태양전지 개발에 적용하여 2.2% 효율의 고분자/양자점 하이브리드 태양전지를 개발했고, 성능을 더욱 높이는 연구를 진행하고 있다. 특히 최근에 지식경제부 선정 유기 및 양자점 태양전지 GET-Future 연구실로 선정되어 세계 최고 수준의 차세대 박막 태양전지 개발과 인력 양성에 노력하고 있다.

3.2 국제적 공동연구 네트워크 구축

본 연구실은 서울대 차국현, 이성훈 교수팀, 부산대 황도훈 교수팀, 인하대 이진균 교수팀 등 다수의 국내 연구팀과 공동연구를 수행하고 있고, 위 그림에 나타난 것과 같이 독일 Johannes Gutenberg University의 Rudolf Zentel 교수팀, 스탠포드 대학교 Michael McGehee 교수팀 등과의 국제 공동연구도 활발하게 진행하고 있다. 특히 독일의 Max Planck Institute for Polymer Research 및

Johannes Gutenberg University와 매년 공동 세미나를 개최하고 학생 교환을 하고 있으며, 공동연구를 통해 고분자-QD 하이브리드 물질을 개발하여 효율과 수명이 향상된 발광다이오드를 개발했고 (*ACS Nano* **3**, 1063 (2009); *Adv. Mater.* **21**, 5022 (2009)), 이 물질을 이용한 유기/양자점 하이브리드 태양전지 개발에 대한 연구를 진행하고 있다. 또한 유기태양전지 분야에서 우수한 연구성과를 내고 있는 스탠포드 대학교의 McGehee 교수팀과 유기태양전지에 대한 공동연구를 진행하고 있으며, 영국 Imperial college의 Center for Plastic Electronics의 D. Bradley 교수팀과 인쇄전자 소자 기술에 대한 협력 연구를 진행하고 있다. 이와 같은 세계적인 연구팀과의 공동연구를 통해 대학원생들이 국제 공동연구 경험을 쌓고, 인적 네트워크를 국제적으로 확장할 수 있도록 지원하고 있다.

4. 향후 전망

유기반도체 기반의 유기전자공학은 OLED 디스플레이의 성공적인 상용화에 이어서 OTFT, 유기태양전지 등도 곧 상용화가 될 것으로 예상되고 있어 미래의 핵심 성장 산업이 될 것으로 예상되고 있다. 다행히 우리나라는 AMOLED 상용화를 세계 최초로 성공시켜서 세계 1위의 시장 점유율을 확보하는 큰 성과를 내고 있다. 그러나 미국, 유럽, 일본보다 연구를 늦게 시작하여 기초 원천 기술에는 뒤처져 있고, 연구 기반도 부족한 실정이다. 그리고 유기태양전지, 양자점 태양전지 등 차세대 박막태양전지

에 대한 연구는 선진국에 비해 많이 뒤쳐져 있다. 따라서 향후 큰 산업으로 성장할 유기전자공학 분야의 국제적인 경쟁력을 확보하기 위해서는 우리가 뒤쳐져 있는 기초 연구에 더욱 힘을 쏟고, 우수한 연구 인력을 양성해야 한다. 이를 위해 본 연구실은 유기반도체의 기본 물성과 소자 물리에 대한 연구를 바탕으로 유기 광전자소자의 핵심 기술

개발에 연구를 집중하고 있으며, 이 분야 연구를 선도해 나갈 석박사 인력 양성에 힘쓰고 있다. 특히 최근에는 유기 및 양자점 태양전지 GET-Future 연구실로 선정되어 세계 최고 수준의 차세대 박막태양전지 개발과 인력 양성에 노력하고 있으며, OLED에서와 같이 유기태양전지 분야에서도 우리나라가 세계를 선도하는데 기여하고자 한다.

5. 유기물 반도체 연구실 연구원 소개

이창희 교수 | 연구책임자

· 연구분야 : 유기물 소자
· e-mail : chlee7@snu.ac.kr

박정호 박사 | 책임연구원

· 연구분야 : 유기태양전지 소자
· e-mail : park.nano@gmail.com

Mariyappan Thambidurai | 박사후연구원

· 연구분야 : 양자점태양전지 소자
· e-mail : thambidurai.phy@gmail.com

안필수 | 박사과정

· 연구분야 : 유기발광다이오드 시뮬레이션 및 모델링
· e-mail : utoahn7@snu.ac.kr

양정진 | 박사과정

· 연구분야 : 유기발광다이오드 소자 테스트
· e-mail : jini4@snu.ac.kr

이현구 | 박사과정

· 연구분야 : 유기물 소자
· e-mail : lhk108@gmail.com

강찬모 | 박사과정

· 연구분야 : 유기물 소자 테스트 및 프린팅
· e-mail : nkcm2@snu.ac.kr

이동구 | 박사과정

· 연구분야 : 유기태양전지 및 양자점 소자
· e-mail : dglee@snu.ac.kr

김준영 | 박사과정

· 연구분야 : 유기태양전지 소자
· e-mail : kimjy86@snu.ac.kr

송형준 | 박사과정

· 연구분야 : 유기물 소자
· e-mail : songguru@hotmail.com

박수연 | 박사과정

· 연구분야 : 유기물 소자 시뮬레이션
· e-mail : appleiv@gmail.com

박명진 | 박사과정

· 연구분야 : 유기물 소자 패터닝 및 양자점 소자
· e-mail : lightjin@snu.ac.kr

신호정 | 박사과정

· 연구분야 : 유기물 소자
· e-mail : dipsy83@snu.ac.kr

노정균 | 박사과정

· 연구분야 : 인쇄 전자 소자
· e-mail : esperejo@snu.ac.kr

고영준 | 석사과정

· 연구분야 : 인쇄 전자 소자
· e-mail : yjko88@gmail.com

권영원 | 석사과정

· 연구분야 : 유기물 소자 패터닝
· e-mail : tubasa@snu.ac.kr

송지연 | 석사과정

· 연구분야 : 유기물 소자
· e-mail : jysong89@snu.ac.kr

신현우 | 석사과정

· 연구분야 : 유기박막트랜지스터
· e-mail : chrissin@snu.ac.kr

정희영 | 석사과정

· 연구분야 : 양자점
· e-mail : clazclaz@snu.ac.kr

이연경 | 석사과정

· 연구분야 : 유기태양전지
· e-mail : superb@snu.ac.kr

Felix Penningsfeld | 석사과정

· 연구분야 : 유기물 소자
· e-mail : penningsfeld@snu.ac.kr

Evgeny Kornev | 석사과정

· 연구분야 : 유기물 소자
· e-mail : manui899@hotmail.com