(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0138255
(43) 공개일자 2021년11월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C25B 11/04 (2021.01) *C25B 1/00* (2021.01)
C25B 1/04 (2021.01)
(52) CPC특허분류
C25B 11/051 (2021.01)
C25B 1/04 (2021.01)
(21) 출원번호 10-2020-0056367
(22) 출원일자 2020년05월12일
심사청구일자 2020년05월12일

(71) 출원인
에쓰대시오일 주식회사
서울 마포구 백범로 192, (공덕동)
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
권성우
울산광역시 남구 동산로29번길 19, 에이3동 303호(신정동, 쌍용아파트)
백상철
경기도 김포시 김포한강11로255번길 15, 108동 2004호(운양동, 김포한강 이랜드 타운힐스)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인충현

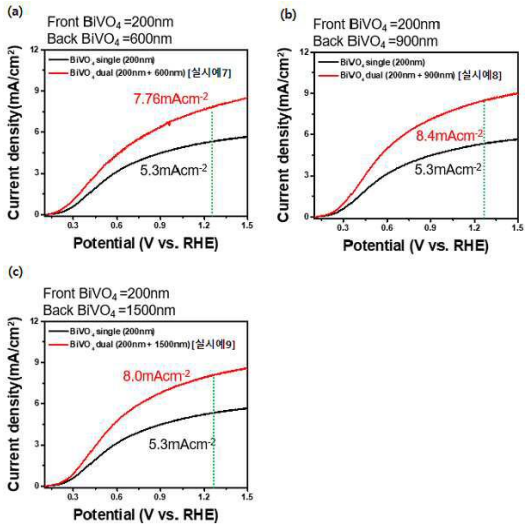
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 **대면적화가 가능한 물분해용 광전기화학 광전극 및 이를 포함하는 물분해 장치**

(57) 요 약

본 발명은 투명전극기판, 및 상기 투명전극기판 상에 배치된 광양극(photoanode)층을 포함하는 판상형 광전극;를 포함하고, 광전극은 복수 개로 존재하고, 복수 개의 광전극은 하나의 광전극의 투명전극기판과 다른 하나의 광전극의 광양극층이 서로 이격되어 대향하도록 위치하는 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극에 관한 것이다. 이에 의하여, 물분해 성능을 향상시키면서 대면적화를 가능하게 한다.

대 표 도 - 도9



(52) CPC특허분류
C25B 1/55 (2021.01)
C25B 11/073 (2021.01)
(72) 발명자
장지현
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
윤기용
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

명 세 서

청구범위

청구항 1

투명전극기판, 및 상기 투명전극기판 상에 배치된 광양극(photoanode)층을 포함하는 판상형 광전극;를 포함하고,

상기 판상형 광전극은 복수 개로 존재하고, 복수 개의 상기 판상형 광전극은 소정의 간격으로 이격되어 면이 서로 대향하도록 위치하는 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 광전기화학 광전극은 빛의 조사시 상기 복수 개의 광전극을 모두 투과한 빛이 상기 빛의 조사를 직접 받는 전면 광전극과 반대측에 위치하는 후면 광전극 측으로 조사되도록 반사시키는 반사체;를 추가로 포함하는 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 반사체는 상기 후면 광전극의 일측면을 따라 판상형으로 배치되는 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 반사체는 상기 후면 광전극과 3 내지 45 ° 의 각도를 이루도록 설치되는 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 5

제2항에 있어서,

상기 반사체는 유리, 수정, 암염, 금속 및 고분자 중에서 선택된 어느 하나의 소재인 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 광전극은 2개의 판상형 광전극을 포함하는 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 7

제6항에 있어서,

성기 2개의 판상형 광전극은 광양극층이 배치되지 않은 투명전극기판의 면이 서로 마주보도록 위치하는 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 8

제6항에 있어서,

상기 2개의 판상형 광전극에 각각 배치된 광양극층은 두께가 서로 동일하고, 500 내지 700㎚ 두께로 형성된 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 9

제6항에 있어서,

상기 2개의 판상형 광전극에 각각 배치된 광양극층은 두께가 서로 다르고, 빛의 조사를 직접 받는 전면의 광양극층의 두께는 50 내지 450nm이고, 나머지 후면의 광양극층의 두께는 600 내지 1500nm 인 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 10

제6항에 있어서,

상기 2개의 판상형 광전극은 0.1 내지 1.0 ㎜의 간격으로 이격되도록 설치되는 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 판상형 광전극은 정사각 판상형 광전극 또는 직사각 판상형 광전극인 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 12

제1항에 있어서,

상기 광양극층의 가로너비와 세로너비는 1:1 내지 1:100 인 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 13

제1항에 있어서,

상기 투명전극 기판은 FTO, ZnO, ITO, AZO, GZO, IZO, 및 IGZO 중에서 선택된 어느 하나인 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 14

제1항에 있어서,

상기 광양극(photoanode)층은 비스무스 바나데이트($BiVO_4$), 헤마타이트 (Fe_2O_3), 및 텅스텐산화물(WO_3) 중에서 선택된 어느 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극.

청구항 15

제1항 내지 제14항 중에서 선택된 어느 한 항의 물분해용 광전기화학 광전극을 포함하는 물분해 장치.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 대면적화가 가능한 물분해용 광전기화학 광전극 및 이를 포함하는 물분해 장치에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 광전극의 디자인을 변형함으로써 대면적화를 가능하게 하여 물분해 효율을 증가시킬 수 있는 본 발명은 대면적화가 가능한 물분해용 광전기화학 광전극 및 이를 포함하는 물분해 장치에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 지구온난화, 대기오염, 에너지공급을 고려한 해결방안은 화석연료를 대체하면서 친환경적인 에너지 원료를 찾아내는 것이다. 지구 표면 (물과 땅)에 공급되는 태양에너지(173,000 TW)는 오늘날 세계 총 소비 에너지(17.91 TW in 2017)의 9600배나 더 크다. 태양에너지는 태양계에 공급할 정도로 많은 에너지를 지니고 있지만 이것을 활용, 저장, 수확하는 기술들은 경제적인 면에서 아직 해결해야 할 문제로 남겨지고 있다

[0003] 태양에너지를 활용하기 위한 태양열, 광전지, 태양연료와 같은 기술들이 연구되고 있다. 오늘날에는 광전지가

널리 사용되고 있는 기술이다. 하지만 광전지는 전기를 생산하지만 그 전기를 저장함에 있어 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 태양에너지를 쉽게 저장 가능한 화학 에너지 및 연료로 변환하는 것이 이상적인 방법으로 관심을 받아왔다. 다양한 태양연료 방법 중에 태양 에너지를 이용한 물 분해를 통해 얻은 수소가스(H_2)는 유망한 연료로써 관심을 받고 있다.

[0004] 수소가스는 기존에 쓰이는 화석연료들(methane 55.5 MJ kg^{-1}, gasoline 47.5 MJ kg^{-1}, diesel 44.8 MJ kg^{-1}, methanol 20.0 MJ kg^{-1})에 비해 높은 gravimetric heating value 141.9MJ kg^{-1})를 가지고 있으며 태워서 나오는 부산물은 물에 불과하다. 하지만 대부분의 수소가스는 화석연료를 개질하여 얻기 때문에 많은 양의 CO_2가 발생한다. 따라서 합리적인 비용으로 지속가능하고 탄소 발생이 적으면서 산업규모로 실현 가능한 수소가스 생산 시스템을 구축할 필요가 있다. PEC(광전기화학) 물분해는 태양에너지를 이용한 수소가스 생성 방법으로 될 가능성이 높다.

[0005] PEC 물분해에 관한 연구들은 주로 재료 개발, 물리화학, 시스템에 관해서 다루어 왔다. 하지만 대체로 큰 규모에서의 PEC 물분해 시스템에 대해서는 많이 다루어지지 않았다. 이 부분은 실현 가능한 수소가스 생산을 위해서는 언젠가는 PEC 물분해 기술이 꼭 거쳐야 할 과정이다.

[0006] 대면적화(Scale up)에 있어서 첫 번째 문제는 기재의 시트 저항(sheet resistance) 때문에 광전극의 크기가 커지면 전체 효율이 줄어든다. 두 번째 문제는 대면적화는 실험실 스케일에서의 제작과는 다른 제작방법이 요구되는데 이 과정에서 생성되는 공간적 결함(spatial defects)들과 전체 옴 저항(ohmic resistance)의 증가가 대면적화된 광전극의 효율을 감소시킬 수 있다. 마지막 문제는 생성되는 연료(H_2: 수소가스, O_2: 산소가스)의 분리(separation)이다. 보통 연료 분리(Fuel separation)을 위해 분리막(membrane separator)를 사용하는데 아직 몇몇 PEC 연구에서만 다루어졌고 이러한 연구들은 분리막 적용이 높은 에너지 손실이 수반된다고 보고하고 있다. 그러므로 실험실 규모에서 대면적화된 PEC 규모 변화는 위와 같은 원인들 때문에 전체 PEC 효율이 감소될 수 있다. 따라서 이러한 효율 감소를 최소화 시키면서 PEC의 대면적화를 구현하는 기술이 필요한 실정이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 한국등록특허 제10-1992966호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명의 목적은 디자인의 변형을 통하여 광전기화학 물분해의 효율을 감소시키지 않으면서 대면적화를 구현할 수 있는 물분해용 광전기화학 광전극을 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

[0009] 본 발명의 일 측면에 따르면,

[0010] 투명전극기판, 및 상기 투명전극기판 상에 배치된 광양극(photoanode)층을 포함하는 판상형 광전극;를 포함하고,

[0011] 상기 판상형 광전극은 복수 개로 존재하고, 복수 개의 상기 판상형 광전극은 소정의 간격으로 이격되어 면이 서로 대향하도록 위치하는 것을 특징으로 하는 물분해용 광전기화학 광전극이 제공된다.

[0012] 상기 광전기화학 광전극은 빛의 조사시 상기 복수 개의 광전극을 모두 투과한 빛이 상기 빛의 조사를 직접 받는 전면 광전극과 반대측에 위치하는 후면 광전극 측으로 조사되도록 반사시키는 반사체;를 추가로 포함할 수 있다.

[0013] 상기 반사체는 상기 후면 광전극의 일측면을 따라 판상형으로 배치될 수 있다.

[0014] 상기 반사체는 상기 후면 광전극과 3 내지 45 ° 의 각도를 이루도록 설치될 수 있다.

[0015] 상기 반사체는 유리, 수정, 암염, 금속 및 고분자 중에서 선택된 어느 하나의 소재일 수 있다.

[0016] 상기 광전극은 2개의 판상형 광전극을 포함할 수 있다.

[0017] 상기 2개의 판상형 광전극은 광양극층이 배치되지 않은 투명전극기판의 면이 서로 마주보도록 위치할 수 있다.

[0018] 상기 2개의 판상형 광전극에 각각 배치된 광양극층은 두께가 서로 동일하고, 500 내지 700nm 두께로 형성될 수 있다.

[0019] 상기 2개의 판상형 광전극에 각각 배치된 광양극층은 두께가 서로 다르고, 빛의 조사를 직접 받는 전면의 광양극층의 두께는 50 내지 450nm이고, 나머지 후면의 광양극층의 두께는 600 내지 1500nm 일 수 있다.

[0020] 상기 2개의 판상형 광전극은 0.1 내지 1.0 ㎜의 간격으로 이격되도록 설치될 수 있다.

[0021] 상기 판상형 광전극은 정사각 판상형 광전극 또는 직사각 판상형 광전극일 수 있다.

[0022] 상기 광양극층의 넓이는 0.1 내지 100 cm^2 일 수 있다.

[0023] 상기 광양극층의 가로너비와 세로너비는 1:1 내지 1:100 일 수 있다.

[0024] 상기 투명전극 기판은 FTO (Fluorine doped Tin Oxide), ZnO(Zinc Oxide), ITO(Indium Tin Oxide), AZO(Antimony Zinc Oxide), GZO(Gallium doped Zinc Oxide), IZO(Indium Zinc Oxide), 및 IGZO(Indium gallium zinc oxide) 중에서 선택된 어느 하나일 수 있다.

[0025] 상기 광양극(photoanode)층은 비스무스 바나데이트($BiVO_4$), 헤마타이트 (Fe_2O_3), 및 텅스텐산화물(WO_3) 중에서 선택된 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0026] 본 발명의 다른 하나의 측면에 따르면,

[0027] 상기 물분해용 광전기화학 광전극을 포함하는 물분해 장치가 제공된다.

발명의 효과

[0028] 본 발명의 물분해용 전기화학 광전극은 광전극을 상하로 복수 개 배치하고, 후면에 반사체를 도입하며, 광전극에서 광양극의 크기, 형태, 위치 및 두께를 조절함으로써 광전극 전체에 빛이 효과적으로 전달되도록 하며, 빛에 의해 생성된 전자의 투명전극까지의 이동거리를 감소시킴으로써 광효율을 최대화하여 물분해 성능을 향상시키면서도 대면적화를 가능하게 하는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0029] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 정사각 판상형 광전극(a)과 직사각 판상형 광전극(b)의 개략적 구조이다.

도 2는 비교예 1 및 비교예 2의 광전극(a)와 비교예 3의 광전극(b)의 개략적 구조이다.

도 3은 실험예 1의 광전기화학적 전극 면적에 따른 물분해 성능 분석 결과이다.

도 4는 실험예 2의 광전극 형태에 따른 물분해 성능 분석 결과이다.

도 5는 실험예 3의 광전극 개수, 형태 및 반사체 유무에 따른 광전극의 효과 분석 결과이다.

도 6은 하부 전극의 광양극의 위치가 서로 반대측으로 형성된 실시예 1과 실시예 5의 전기화학적 광전극의 구조를 비교하여 나타낸 것이다.

도 7은 실험예 4의 광양극 위치에 따른 물분해 성능 분석 결과이다.

도 8은 실험예 5의 광양극 두께에 따른 물분해 성능 분석 결과이다.

도 9는 실험예 6의 상하 광양극 두께를 달리하는 경우 물분해 성능 분석 결과이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0030] 본 발명은 다양한 변환을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 상세한 설명에 구체적으로 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변환, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어

야 한다. 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.

[0031] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0033] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 정사각 판상형 광전극(a)과 직사각 판상형 광전극(b)의 개략적 구조를 나타낸 것이다. 이하, 도 1을 참조하여 본 발명의 물분해용 광전기화학 광전극에 대해 설명하도록 한다.

[0034] 본 발명의 물분해용 광전기화학 광전극은 투명전극기판, 및 상기 투명전극기판 상에 배치된 광양극(photoanode)층을 포함하는 판상형 광전극;를 포함하고,

[0035] 상기 판상형 광전극은 복수 개로 존재하고, 복수 개의 상기 판상형 광전극은 소정의 간격으로 이격되어 면이 서로 대향하도록 위치하는 것을 특징으로 한다. 이에 따라 하나의 광전극으로 입사한 빛은 투명전극기판을 투과하여 다른 하나의 광전극에 도달할 수 있다.

[0036] 바람직하게는, 상기 광전기화학 광전극은 빛의 조사시 상기 복수 개의 광전극을 모두 투과한 빛이 상기 빛의 조사를 직접 받는 전면 광전극과 반대측에 위치하는 후면 광전극 측으로 조사되도록 반사시키는 반사체;를 추가로 포함할 수 있다.

[0037] 상기 반사체는 도 1에 도시된 바와 같이 상기 후면 광전극의 일측면을 따라 판상형으로 위치할 수 있고, 이때 상기 반사체는 상기 후면 광전극과 3 내지 45 ° 의 각도를 이루도록 설치되는 것이 바람직하다.

[0038] 한편, 상기 반사체는 상기 반사체는 유리, 수정, 암염, 금속 및 고분자 소재 등으로 제조되는 것이 바람직하다.

[0039] 상기 판상형 반사체는 하나의 예시에 불과하며 본 발명의 범위가 여기에 한정되지 않는다. 반사체는 복수의 광전극을 모두 투과한 빛이 빛의 조사를 직접받지 못하는 후면 광전극에 조사되어 빛의 이용 효율을 높이기 위한 것이므로 상술한 목적을 달성할 수 있고, 광전극의 사용에 장애를 발생시키지 않는 범위에서 다양한 위치, 형태, 소재를 적용한 반사체를 모두 적용할 수 있다.

[0040] 상기 광전극은 2개의 판상형 광전극을 포함하는 것이 바람직하다. 1개의 광전극만 포함하는 경우 이를 물분해 장치에 적용할 경우 물분해 성능이 저하될 수 있고, 3개 이상의 광전극을 포함하는 경우에는 광전극의 개당 광효율이 저하되어 경제적인 측면에서 바람직하지 않을 수 있다.

[0041] 상기 2개의 판상형 광전극은 0.1 내지 1.0 ㎜의 간격으로 이격되도록 설치되는 것이 바람직하고, 더욱 바람직하게는 0.2 내지 0.5 ㎜ 인 것이 바람직하다. 0.1 ㎜ 미만의 간격이면, 하나의 광전극의 투명전극기판이 다른 하나의 광전극 광양극에 접촉할 수 있고, 1.0 ㎜를 초과하면 차지하는 부피가 불필요하게 커질 수 있다.

[0042] 상기 2개의 판상형 광전극은 광양극층이 배치되지 않은 투명전극기판의 면이 서로 마주보도록 위치하는 것이 바람직하다.

[0043] 상기 2개의 판상형 광전극에 각각 배치된 광양극층은 두께가 서로 동일하거나 상이할 수 있다.

[0044] 상기 2개의 판상형 광전극에 각각 배치된 광양극층은 두께가 서로 동일한 경우, 광양극 하나의 두께는 500 내지 700㎚인 것이 바람직하고, 더욱 바람직하게는 550 내지 650㎚일 수 있고, 더욱 더 바람직하게는 580 내지 620㎚일 수 있다. 500㎚ 보다 얇은 경우에는 조사된 빛을 충분히 활용할 수 없고, 700㎚ 보다 두꺼운 경우에는 후면의 광양극에 도달하는 빛이 지나치게 줄어 전체적인 광효율이 저하될 수 있다.

[0045] 더욱 바람직하게는 상기 2개의 판상형 광전극에 각각 배치된 광양극층은 두께가 서로 다르게 형성될 수 있다. 이때, 빛의 조사를 직접 받는 전면의 광양극층의 두께는 50 내지 450㎚이고, 나머지 후면의 광양극층의 두께는 600 내지 1500㎚ 일 수 있다. 더욱 바람직하게는 전면의 광양극층의 두께는 100 내지 350㎚, 후면의 광양극층의 두께는 700 내지 1300㎚, 더욱 더 바람직하게는 전면의 광양극층의 두께는 150 내지 300㎚, 후면의 광양극층의 두께는 800 내지 1000㎚ 일 수 있다. 상기와 같은 범위에서 전면 광양극과 후면 광양극의 두께가 형성될 때 전면 전극에서 조사된 빛을 사용하면서 후면 전극에도 빛을 잘 전달하여 전체 전극에서 가장 높은 광효율을 나타

낼 수 있다.

[0046] 상기 광전극의 판상형 광전극은 정사각 판상형 광전극 또는 직사각 판상형 광전극인 것이 바람직하고, 더욱 바람직하게는 직사각 판상형 광전극일 수 있다.

[0047] 직사각형으로 광전극을 제작하는 경우 정사각형에 비하여 빛에 의해 생성된 전자가 투명전극에 도달하는 이동거리가 상대적으로 작기 때문에 더 큰 면적으로 제조가 가능하며, 이를 복수 개로 배치하여 사용할 경우 반사체에 의해 반사된 빛이 빛이 조사되는 반대측 광전극의 뒷면의 전체적인 면에 대부분 전달될 수 있으므로 광효율을 현저히 향상시킬 수 있다.

[0048] 상기 정사각 판상형 광전극면 넓이는 0.1 내지 100 cm^2 인 것이 바람직하고, 더욱 바람직하게는 0.3 내지 50 cm^2, 더욱 더 바람직하게 1 내지 10 cm^2 일 수 있다. 일 수 있다. 0.1 cm^2 미만인 경우에는 동일한 면적을 기준으로 많은 수의 광전극이 필요하여 제조나 관리에 있어 불편함이 있고, 100 cm^2을 초과하는 경우에는 빛에 의해 발생한 전자가 투명전극에 도달하는 거리가 멀어 전자의 재결합(Recombination)에 의해 투명전극에 도달하는 전자수가 적어지는 문제점이 발생할 수 있다.

[0049] 한편, 상기 직사각 판상형 광전극면 넓이 또한 0.1 내지 100 cm^2 인 것이 바람직하고, 더욱 바람직하게는 0.3 내지 50 cm^2, 더욱 더 바람직하게 1 내지 10 cm^2 일 수 있다. 0.1 cm^2 미만인 경우에는 동일한 면적을 기준으로 많은 수의 광전극이 필요하여 제조나 관리에 있어 불편함이 있다. 직사각형의 경우에는 짧은 측면의 길이가 생성된 전자의 이동거리로 적합하다면 긴 측면의 길이는 이론상 제한 없이 길어질 수 있으나, 제조 또는 관리상 효율, 편리성 등을 고려하여 100 cm^2 를 초과하는 것은 바람직하지 않다. 그러나 상기 직사각 판상형 광전극면 넓이는 관리상, 제조상의 문제 외에는 광전극 효율과는 직접적인 관련이 없으므로 본 발명의 범위가 상기 넓이의 범위에 한정되지 않으며 그 활용에는 제한이 없다.

[0050] 상기 광양극층의 가로너비와 세로너비는 1:1 내지 1:100 의 비율인 것이 바람직하고, 더욱 바람직하게는 1:2 내지 1:100, 더욱 더 바람직하게는 1:10 내지 1:50, 가장 바람직하게는 1:20 내지 1:30 일 수 있다. 가로너비와 세로너비의 비율이 적을수록 빛에 의해 발생한 전자가 투명전극에 도달하는 거리가 멀어 전자의 재결합(Recombination)에 의해 투명전극에 도달하는 전자수가 적어질 수 있고, 가로너비와 세로너비의 비율이 지나치게 커지면 제조 또는 관리상 효율이 저하될 수 있으므로 1:20 내지 1:30의 비율로 제작하는 것이 광효율이나 관리상 효율을 고려하여 가장 유리할 수 있다.

[0051] 상기 투명전극 기판은 FTO, ZnO, ITO, AZO, GZO, IZO, 및 IGZO 중에서 선택된 어느 하나일 수 있다.

[0052] 상기 광양극(photoanode)층은 비스무스 바나데이트($BiVO_4$), 헤마타이트 (Fe_2O_3), 및 텅스텐산화물(WO_3) 중에서 선택된 어느 하나인 것이 바람직하고, 더욱 바람직하게는 비스무스 바나데이트($BiVO_4$) 일 수 있다.

[0054] 본 발명은 상기 물분해용 광전기화학 광전극을 포함하는 물분해 장치를 제공한다.

[0056] 특히, 하기 실시예에는 명시적으로 기재하지는 않았지만 본 발명의 물분해용 광전기화학 광전극에 있어서, 광전극의 개수, 광전극의 형태, 크기, 반사체의 후면 광전극과 이루는 각도, 반사체 소재, 두 광전극 간의 간격, 투명전극 기판 종류, 광양극층의 종류를 달리하면서 물분해용 광전기화학 광전극의 성능을 확인하였다.

[0057] 그 결과, 다른 조건 및 다른 수치 범위에서와는 달리, 아래의 조건을 모두 만족하는 경우에만 이를 물분해 장치에 적용하였을 때, 가장 물분해 성능이 우수한 것으로 나타났다.

[0058] 이에 따른 조건은 광전극을 듀얼 시스템으로 제조하고, 광전극의 형태는 직사각형, 반사체 후면과 광전극이 이루는 각도는 8 내지 12° , 반사체 소재는 금속, 그 중에서도 은(Ag), 2개의 광전극간 거리는 0.2 내지 0.3 mm, 직사각형 광전극면의 짧은 측면 길이는 0.2 내지 0.3 cm, 광전극면 넓이는 관리상, 제조상 문제 외에 효율과는 직접적 관련이 없었고, 투명전극 기판은 FTO, 광양극층은 비스무스 바나데이트($BiVO_4$)를 사용한 것이다.

[0060] 이하, 본 발명의 이해를 돕기 위하여 바람직한 실시예를 제시하나, 하기 실시예는 본 발명을 예시하는 것일 뿐 본 발명의 범주 및 기술사상 범위 내에서 다양한 변경 및 수정이 가능함은 당업자에게 있어서 명백한 것이며, 이러한 변형 및 수정이 첨부된 특허청구범위에 속하는 것도 당연한 것이다.

[0062] **[실시예]**

[0063] **실시예 1: 듀얼형+반사체+정사각형 광전극**

[0064] $1cm^2$ 면적 2mm 두께의 정사각형 FTO 투명전극기판 상에 600nm 두께 동일 면적의 정사각형 $BiVO_4$ 광양극층을 형성하여 광전극을 제조하였다. 제조된 광전극 2개가 1mm의 간격을 두고 서로 마주보는 형태로 배치하되, 2개의 광전극은 모두 $BiVO_4$ 광양극층이 상부를 향하도록 하여 상부 광전극의 FTO 투명전극기판과 하부 광전극의 $BiVO_4$ 광양극층이 서로 마주보도록 하였다. 또한, 일반적인 거울 재질의 5mm 두께 반사체(reflector)(1cm x 1cm)은 빛이 조사되는 반대측의 $BiVO_4$ 광양극층의 일측면에 광전극면과 30° 의 각을 이루도록 설치하여 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0066] **실시예 2: 듀얼형+반사체+직사각형 광전극**

[0067] 정사각형 광전극 대신에 동일 면적의 직사각형(0.2 cm x 5.0 cm)의 광전극을 사용하고 직사각형 광전극의 측면 길이에 상응하는 반사체(0.2 cm x 5.0 cm)를 사용한 것을 제외하고는 실시예 1과 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0069] **실시예 3: 듀얼형+정사각형 광전극**

[0070] 반사체를 사용하지 않은 것을 제외하고는 실시예 1과 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0072] **실시예 4: 듀얼형+직사각형 광전극**

[0073] 반사체를 사용하지 않은 것을 제외하고는 실시예 2와 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0075] **실시예 5: 듀얼형+반사체+직사각형 광전극(광양극층 위치 조정)**

[0076] 2개의 광전극이 서로 마주보는 형태로 배치하되, 상부 및 하부 광전극이 FTO 투명전극기판이 서로 마주보도록, 즉 상부 광전극은 $BiVO_4$ 광양극층이 위로 향하고, 하부 광전극은 $BiVO_4$ 광양극층이 아래로 향하도록 배치한 것을 제외하고는 실시예 2와 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0078] **실시예 6: 듀얼형+직사각형 광전극(광양극층 위치 조정)**

[0079] 반사체를 사용하지 않은 것을 제외하고는 실시예 5와 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다

[0081] **실시예 7: 듀얼형+반사체+직사각형 광전극(광양극층 두께 조정)**

[0082] 상부 광전극의 $BiVO_4$ 광양극층의 두께는 200nm로 형성하고, 하부 광전극 $BiVO_4$ 광양극층의 두께는 600nm로 형성한 것을 제외하고는 실시예 5와 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0084] **실시예 8: 듀얼형+반사체+직사각형 광전극(광양극층 두께 조정)**

[0085] 하부 광전극 $BiVO_4$ 광양극층의 두께를 900nm로 형성한 것을 제외하고는 실시예 7와 동일하게 물분해용 광전기화

학 광전극을 제조하였다.

[0087] **실시예 9: 듀얼형+반사체+직사각형 광전극(광양극층 두께 조정)**

[0088] 하부 광전극 $BiVO_4$ 광양극층의 두께를 1500nm로 형성한 것을 제외하고는 실시예 7와 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0090] **실시예 10: 듀얼형+직사각형 광전극(광양극층 두께 조정)**

[0091] 상부 및 하부 광전극의 $BiVO_4$ 광양극층의 두께를 모두 200nm로 형성한 것을 제외하고는 실시예 4와 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0093] **실시예 11: 듀얼형+직사각형 광전극(광양극층 두께 조정)**

[0094] 상부 및 하부 광전극의 $BiVO_4$ 광양극층의 두께를 모두 900nm로 형성한 것을 제외하고는 실시예 4와 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0096] **실시예 12: 듀얼형+직사각형 광전극(광양극층 두께 조정)**

[0097] 상부 및 하부 광전극의 $BiVO_4$ 광양극층의 두께를 모두 1500nm로 형성한 것을 제외하고는 실시예 4와 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0099] **비교예 1: 싱글형+정사각형 광전극**

[0100] 정사각형 광전극을 하나만 사용한 것을 제외하고는 실시예 3과 동일하게 광전극을 제조하였다.

[0102] **비교예 2: 싱글형+정사각형 광전극**

[0103] $1cm^2$의 정사각형 광전극 대신에 0.3cm x 0.3cm = $0.09cm^2$ 면적의 National Renewable Energy Laboratory (NREL)에서 정한 실험실 규모의 광전극을 사용한 것을 제외하고는 비교예 1과 동일하게 광전극을 제조하였다.

[0105] **비교예 3: 싱글형+직사각형 광전극**

[0106] 직사각형 광전극을 하나만 사용한 것을 제외하고는 실시예 4와 동일하게 광전극을 제조하였다.

[0108] **비교예 4: 듀얼형+직사각형 광전극(광양극층 두께 조정)**

[0109] $BiVO_4$ 광양극층의 두께를 200nm로 형성한 것을 제외하고는 비교예 3과 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0111] **비교예 5: 듀얼형+직사각형 광전극(광양극층 두께 조정)**

[0112] $BiVO_4$ 광양극층의 두께를 900nm로 형성한 것을 제외하고는 비교예 3과 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0114] **비교예 6: 듀얼형+직사각형 광전극(광양극층 두께 조정)**

[0115] $BiVO_4$ 광양극층의 두께를 1500nm로 형성한 것을 제외하고는 비교예 3과 동일하게 물분해용 광전기화학 광전극을 제조하였다.

[0117] 실시예 1의 광전극(a)과 실시예 2의 광전극(b)의 개략적 구조를 도 1에 나타내었으며, 비교예 1 및 2의 정사각형 광전극(a)와 비교예 3 내지 6의 직사각형 광전극(b)의 개략적 구조를 도 2에 나타내었다.

[0118] 또한, 실시예 1 내지 12, 및 비교예 1 내지 6의 광전극의 구성을 정리하여 아래의 표 1에 나타내었다.

표 1

[0119]

구분	광전극 형태	광전극(광양극) 면적(cm^2)/개	광전극 개수	광양극 두께(nm)		하부 광전극의 광양극 위치	반사체 유무
				상부	하부		
실시예 1	정사각형	1	2	600	600	위	있음
실시예 2	직사각형	1	2	600	600	위	있음
실시예 3	정사각형	1	2	600	600	위	없음
실시예 4	직사각형	1	2	600	600	위	없음
실시예 5	직사각형	1	2	600	600	아래	있음
실시예 6	직사각형	1	2	600	600	아래	없음
실시예 7	직사각형	1	2	200	600	아래	있음
실시예 8	직사각형	1	2	200	900	아래	있음
실시예 9	직사각형	1	2	200	1500	아래	있음
실시예 10	직사각형	1	2	200	200	위	없음
실시예 11	직사각형	1	2	900	900	위	없음
실시예 12	직사각형	1	2	1500	1500	위	없음
비교예 1	정사각형	1	1	600		위	없음
비교예 2	정사각형	0.09	1	600		위	없음
비교예 3	직사각형	1	1	600		위	없음
비교예 4	직사각형	1	1	200		위	없음
비교예 5	직사각형	1	1	900		위	없음
비교예 6	직사각형	1	1	1500		위	없음

[0120] **[실험예]**

[0121] **실험예 1: 광전기화학적 전극 면적에 따른 물분해 성능 분석**

[0122] 비교예 1(면적 = 1 cm^2) 및 비교예 2(면적 = 0.09 cm^2)의 정사각형 $BiVO_4$ 광전극의 면적에 따른 물 분해 성능을 테스트하였다. 물 분해 성능테스트에는 solar simulator 1 SUN의 빛이 사용되었으며, 작업전극(working electrode)은 각각 제조된 전극들을 사용하고, 상대전극(counter electrode)은 Pt mesh를 사용하였으며 Ag/AgCl 전극을 기준전극(reference electrode)로 사용하여 RHE(Reversible Hydrogen Electrode)로 광전류 밀도를 계산하였다. 전해질로는 0.2M borate buffer solution에 수소 제조를 극대화 하기 위해 재결합을 막아줄 수 있는 홀 스캐빈저(hole scavenger)로서 역할을 할 수 있는 Na_2O_3를 소량 첨가하여 사용하였다.

[0123] 상술한 방법에 따른 물분해 성능 분석결과를 도 3에 나타내었다. 이에 따르면, 비교예 2의 작은 면적(=0.09 cm^2)을 가진 전극이 높은 광전류 밀도를 보여주고 상대적으로 면적이 큰 비교예 1의 광전극(=1 cm^2)은 광전류 밀도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 광전기화학(PEC)은 빛에 의해 반도체 물질에서 생성된 전자가 FTO 투명전극을 통해 플레티넘(Pt) 촉매까지 도달해야 수소생성반응을 진행할 수 있다. 그러나 도 3의 비교예 1과 비교예 2의 전극 정면도에 도시된 바와 같이 작은 광전극은 빛에 의해 생성된 전자가 빠르게 FTO로 도달할 수 있지만 큰 면적을 가진 광전극에서는 빛에 의해 생성된 전자가 FTO로 도달하기 위해서는 상대적으로 이동거리가 길어진다.

[0124] 이와 같이 전자의 이동거리가 길어지면 수소와 산소의 재결합(Recombination) 확률이 높아지기 때문에, 결과적으로 빛에 의해 생성된 전자 대비 FTO에 도달하는 전자의 양은 상당히 적어지는 것이다. 그러므로 광전극의 면

적을 크게 만들면서 전자의 이동거리를 줄여줄 수 있는 디자인의 광전극 연구가 필요함을 알 수 있었다.

[0126] **실험예 2: 광전극 형태에 따른 물분해 성능 분석**

[0127] 광전극 형태에 따라 물분해 성능의 차이를 비교하기 위하여 실험예 1과 동일한 방법으로 동일한 정사각형이나 형태가 서로 다른 비교예 1(정사각형)과 비교예 3(직사각형)의 광전극에 대해 실험을 수행하여 그 결과를 도 4에 나타내었다. 여기서 (a)는 비교예 1과 3을 비교한 것이고, (b)는 비교예 1과 3의 광전류 밀도를 작은 면적의 광전극인 비교예 2와 비교한 것이다.

[0128] 도 4의 (a)에 따르면, 모든 전압 영역에서 비교예 3의 직사각형 광전극이 비교예 1의 정사각형 광전극에 비해 우수한 물분해 성능을 보여주었다. 이와 같은 이유는 도 2에 나타난 바와 같이 직사각형의 광전극은 빛에 의해 생성된 전자가 FTO에 도달하는 이동거리를 최소화 시켰기 때문에 더 향상된 물 분해 성능을 나타낼 수 있는 것이다.

[0129] 또한 도 4의 (b)에 따르면, 비교예 3의 직사각형 광전극은 비교예 2의 작은 면적의 정사각형 광전극에 비해 물분해 능력이 크게 떨어지지 않음을 확인할 수 있었다. 즉, 비교예 3의 광전극은 비교예 2의 광전극에 비하여 면적이 10배(0.09 cm^2 -> 1 cm^2) 가량 커졌지만 광전류 밀도의 감소가 매우 적게 나타난 것으로 볼 때, 광전극의 대면적화에 있어서 직사각형 광전극이 매우 유리한 디자인임을 확인할 수 있다.

[0131] **실험예 3: 광전극 개수, 형태 및 반사체 유무에 따른 광전극의 물분해 성능 분석**

[0132] 광전극 개수, 형태 및 반사체 유무에 따른 광전극의 물분해 성능을 비교하기 위하여 실험예 1과 동일한 방법으로 실험을 수행하여 그 결과를 도 5에 나타내었다.

[0133] 여기서, 도 5의 (a)는 정사각형(1 cm^2)의 광전극들을 비교한 것으로 광전극을 1개 사용한 싱글 시스템인 비교예 1, 광전극을 2개 사용한 듀얼 시스템인 실시예 3, 듀얼 시스템이면서 동시에 반사체를 사용한 실시예 1의 광전극에 대한 실험 결과이다. 이에 따르면, 싱글 시스템인 비교예 1 보다는 듀얼 시스템인 실시예 3에서 더 많은 전자를 생성하기 때문에 더 우수한 물 분해 성능을 나타내었다. 또한 듀얼 시스템이면서 반사체를 추가로 적용한 실시예 1에서 빛이 조사되는 방향과 반대측에 위치하여 빛을 직접 받지 못하는 광전극에도 효율적으로 빛이 공급되기 때문에 반사체가 없는 실시예 3에 비하여 더 우수한 광전류 밀도를 나타내었다.

[0134] 도 5의 (b)는 직사각형(1 cm^2)의 광전극들을 비교한 것으로 광전극을 1개 사용한 비교예 3, 광전극을 2개 사용한 실시예 4, 광전극을 2개 사용하면서 동시에 반사체를 사용한 실시예 2의 광전극에 대한 실험 결과이다. 이에 따르면, 직사각형 광전극을 사용한 경우 듀얼 시스템인 실시예 4에서 싱글 시스템인 비교예 3에 비하여 광전류 밀도가 큰 폭으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 듀얼 시스템이면서 반사체를 구비한 실시예 2의 경우에는 동일한 조건인 정사각형 광전극인 실시예 1 보다 훨씬 큰 폭으로 광전류 밀도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 이유는 빛이 조사되는 방향과 반대측에 위치하여 빛을 직접 받지 못하는 직사각형 광전극도 반사체에 의해 효율적으로 빛을 공급받을 수 있을 뿐 아니라, 빛에 의해 생성된 전자가 FTO까지 도달하는 이동거리가 짧기 때문에 큰 폭으로 광전류 밀도가 증가할 수 있는 것이다.

[0135] 도 5의 (c)는 광전극을 2개 사용하고, 반사체를 구비하면서 광전극 형태만 서로 상이한 실시예 1과 실시예 2의 광전극에 대한 실험 결과를 나타낸 것이다. 이에 따르면, 1.23V vs RHE에서 실시예 1의 정사각형 광전극은 6.25 mA cm^{-2}의 광전류 밀도를 보여주었고, 실시예 2의 직사각형 광전극은 7.93 mA cm^{-2} 광전류 밀도 수치를 나타내었다. 즉 정사각형 광전극에 비해 직사각형 광전극이 더 우수한 물 분해 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다. 결론적으로, 광전극은 직사각형 형태, 듀얼 시스템, 반사체의 사용이라는 조건을 모두 만족하였을 때 물분해 성능을 가장 높게 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

[0136] 본 발명의 광전극은 투명한 전극이므로 위에 있는 광전극이 빛을 받고 나머지 투과된 빛들이 빛이 조사되는 측과 반대편 있는 광전극에 활용될 수 있다. 또한, 추가로 반사체를 도입하여 하부에 있는 광전극도 효율적으로 빛의 흡수가 가능하다. 한편, 정사각형의 광전극은 반사체의 크기가 제한적이기 때문에 하부 광전극면의 모든 위치에 빛이 공급되기 어렵다. 반면에 직사각형 광전극을 듀얼 시스템으로 적용했을 때 광전극의 폭이 작기 때문에 반사체에 반사된 빛이 하부 광전극면의 모든 위치에 전달되어 광효율을 크게 향상시킬 수 있음을 알 수 있

다.

[0138] **실험예 4: 광양극 위치에 따른 물분해 성능 분석**

[0139] 광전극의 광양극 위치에 따른 물분해 성능 분석을 위하여 실험예 1과 동일한 방법으로 물분해 성능을 분석하였다.

[0140] 도 6은 하부 전극의 광양극의 위치가 서로 반대측으로 형성된 실시예 2와 실시예 5의 전기화학적 광전극의 구조를 비교하여 나타낸 것이다. 이에 따르면 실시예 5의 광전극은 하부 전극에서 광양극의 위치가 실시예 2와 반대측으로 형성되어 반사체를 향하게 설계된 것을 확인할 수 있다.

[0141] 도 7은 본 실험예에 따른 전극 효율을 측정한 결과이다.

[0142] 여기서, 도 7의 (a)는 실시예 2의 전면 전극, 후면 전극 및 전체 전극의 효율을 비교하여 나타낸 것이다.

[0143] 또한, 도 7의 (b)는 광전극의 하부 전극에서 광양극의 위치만 서로 다른 실시예 2와 실시예 5의 하부 전극에 대한 전극 효율을 나타낸 것이다. 이에 따르면, 광양극이 상부 전극과는 반대측으로 형성되어 반사체를 마주보는 실시예 5의 하부 전극이 더 높은 전극 효율을 나타내었다.

[0144] 또한 도 7의 (c)는 실시예 5와 실시예 6의 광전극 전체에 대한 전극 효율을 비교한 것이다. 이에 따르면 두 광전극 모두 하부 전극에서 광양극이 아래에 형성되어 있으나 반사체를 구비한 실시예 5의 광전극이 훨씬 높은 전극 효율을 나타내었다.

[0145] 즉, 하부 전극에서 광양극이 아래 측으로 형성되고, 반사체를 구비한 광전극인 실시예 5가 가장 높은 전극 효율을 나타냄을 확인할 수 있었다.

[0147] **실험예 5: 광양극 두께에 따른 물분해 성능 분석**

[0148] 광전극의 광양극 두께 따른 물분해 성능 분석을 위하여 실험예 1과 동일한 방법으로 물분해 성능을 분석하여 그 결과를 도 8에 나타내었다. 여기서, 광전극은 모두 직사각형(0.2cm x 5cm)이고, 듀얼형의 경우 상하부 전극의 광양극 두께는 서로 동일한 것이다. (a)는 광양극 두께가 200nm인 경우, (b)는 광양극 두께가 600nm인 경우, (c)는 광양극 두께가 900nm인 경우, (d) 광양극 두께가 1500nm인 경우이다.

[0149] 이에 따르면, 싱글형 전극의 경우에는 비교예 5의 900nm 두께의 광양극에서 가장 효율이 높지만, 듀얼형 전극의 경우에는 실시예 4의 600nm 두께에서 가장 높은 효율을 나타냈다. 듀얼형의 경우 상부측 전극이 지나치게 두꺼우면 하부측 전극에서 빛을 효율적으로 사용할 수 없음을 알 수 있었다.

[0151] **실험예 6: 상하 광양극 두께를 달리하는 경우 물분해 성능 분석**

[0152] 본 발명의 듀얼형 광전기화학 광전극에서 상부와 하부의 광양극 두께를 달리한 실시예 7 내지 9의 물분해 성능을 분석하고, 그 결과를 도 9에 나타내었다.

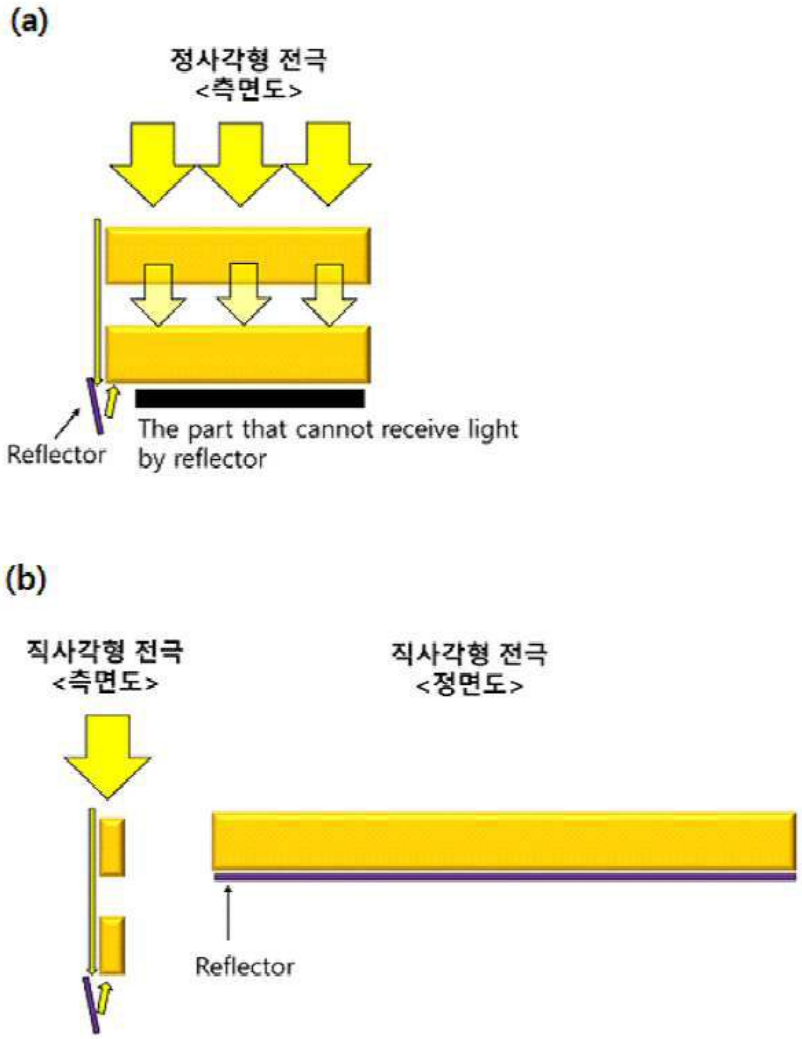
[0153] 이에 따르면, 상부 광양극이 200nm이고, 하부 광양극이 900nm로 형성된 실시예 8의 듀얼형 광전극이 가장 높은 전극 효율을 나타내었다.

[0154] 즉, 본 발명의 물분해용 광전기화학 광전극은 듀얼형이면서, 상부와 하부 광양극의 두께가 각각 200nm, 900nm이고, 반사체를 구비한 경우 가장 높은 전극 효율을 나타내었다.

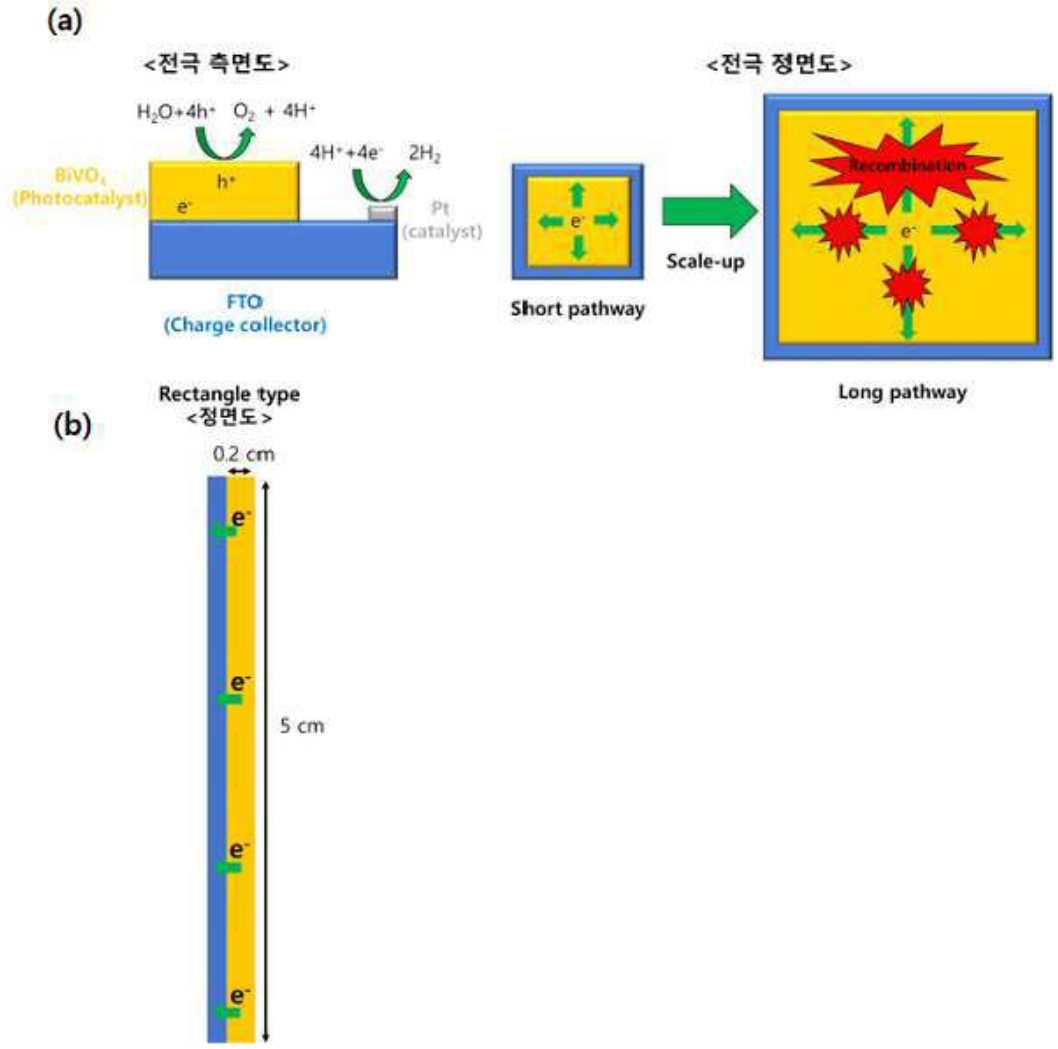
[0156] 이상, 본 발명의 실시예들에 대하여 설명하였으나, 해당 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 특허청구범위에 기재된 본 발명의 사상으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서, 구성 요소의 부가, 변경, 삭제 또는 추가 등에 의해 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있을 것이며, 이 또한 본 발명의 권리범위 내에 포함된다고 할 것이다.

도면

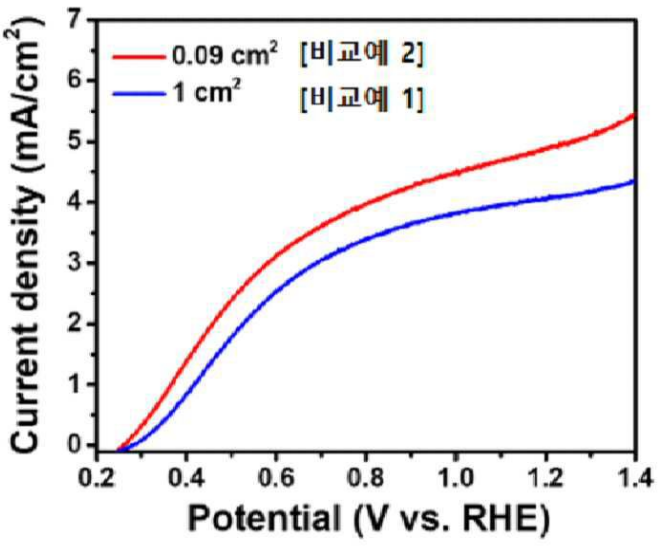
도면1


(a)
정사각형 전극
<측면도>
Reflector
The part that cannot receive light
by reflector
(b)
직사각형 전극
<측면도>
직사각형 전극
<정면도>
Reflector

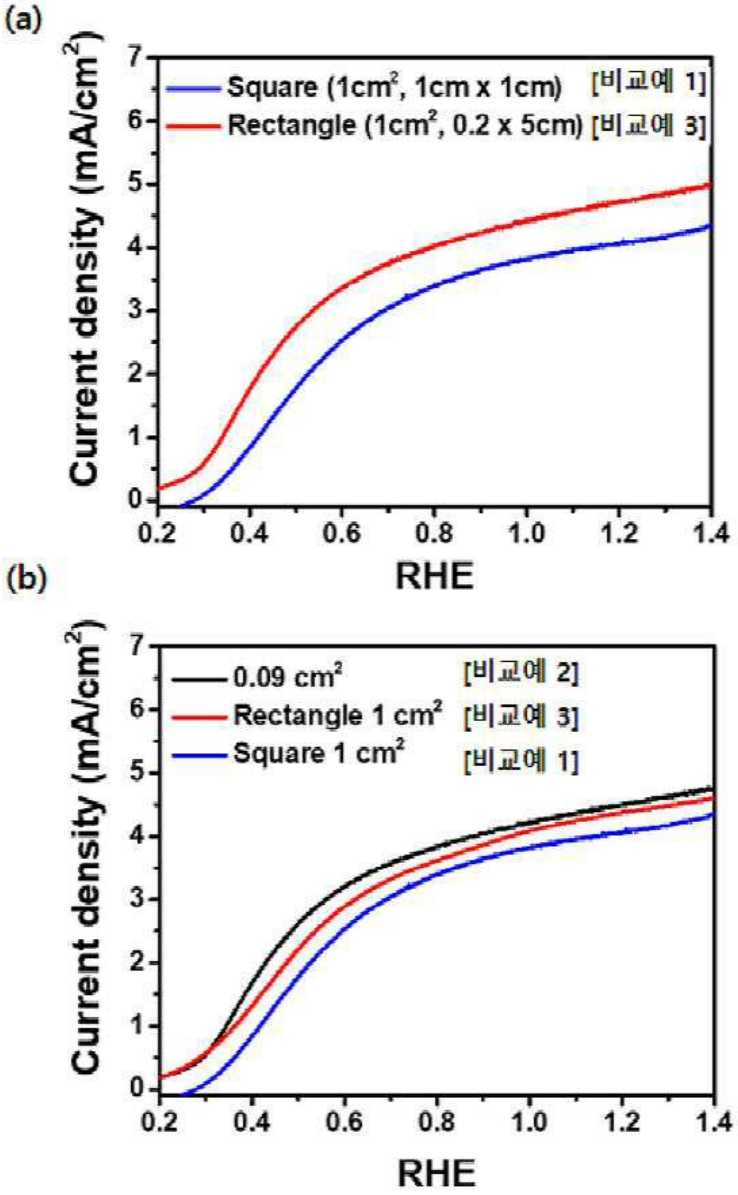
도면2


(a)
<전극 측면도>
<전극 정면도>
H_2O+4h^+ O_2 + $4H^+$
$4H^++4e^-$ $2H_2$
$BiVO_4$
(Photocatalyst)
h^+
e^-
Pt
(catalyst)
FTO
(Charge collector)
Short pathway
Scale-up
Recombination
Long pathway
(b)
Rectangle type
<정면도>
0.2 cm
5 cm

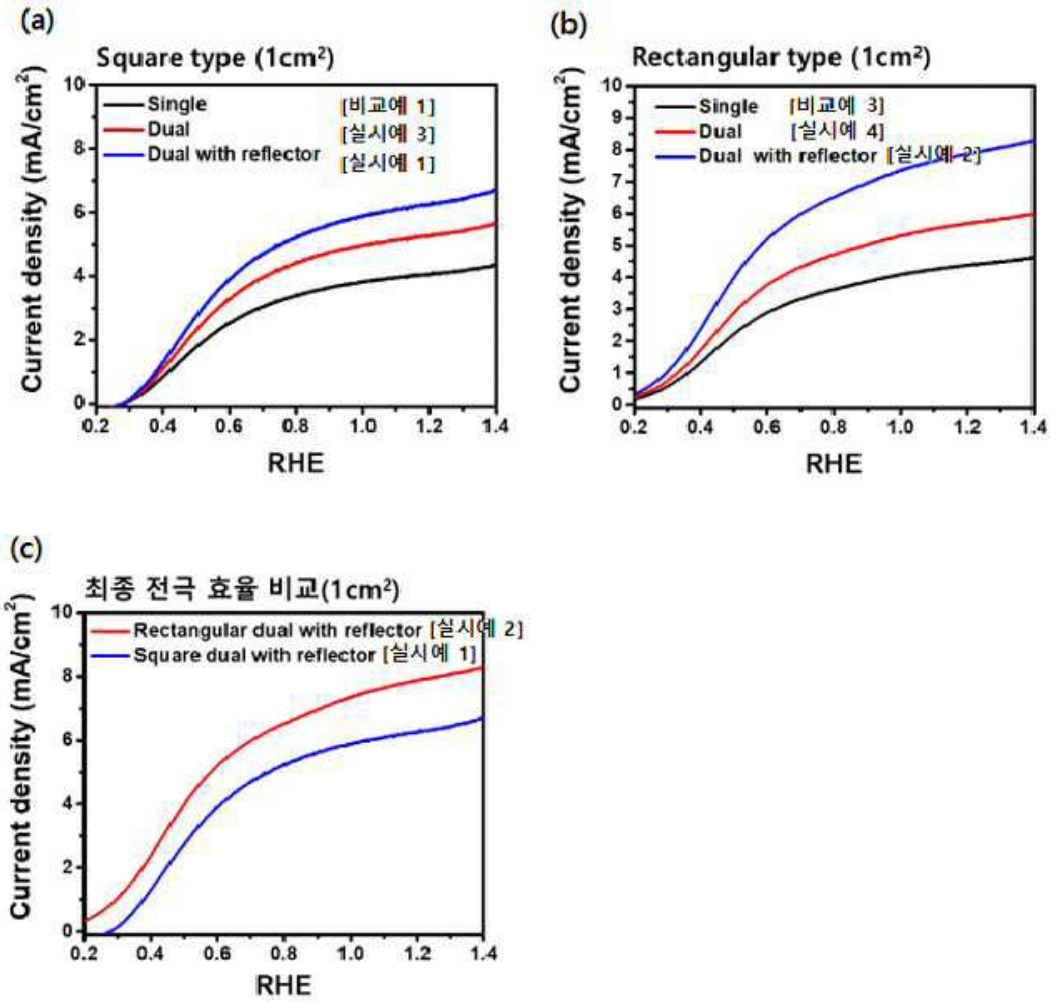
도면3


0.09 cm² [비교예 2]
1 cm² [비교예 1]
Current density (mA/cm²)
Potential (V vs. RHE)
0
1
2
3
4
5
6
7
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4

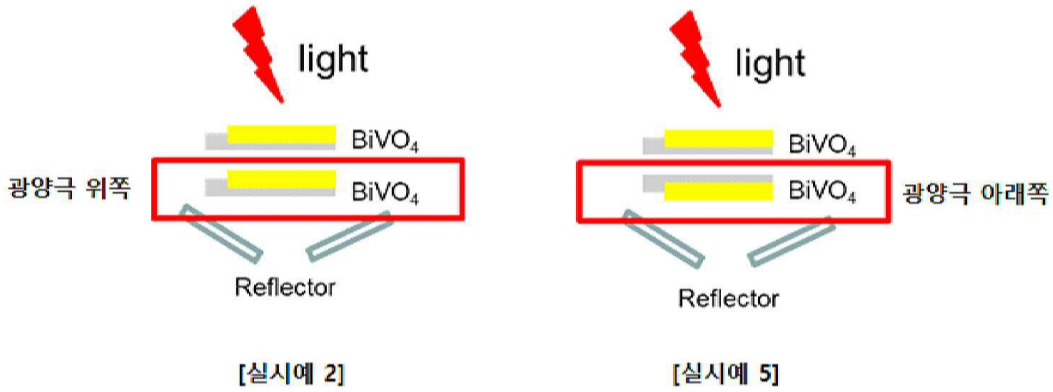
도면4


(a)
Square (1cm², 1cm x 1cm) [비교예 1]
Rectangle (1cm², 0.2 x 5cm) [비교예 3]
Current density (mA/cm²)
RHE
(b)
0.09 cm² [비교예 2]
Rectangle 1 cm² [비교예 3]
Square 1 cm² [비교예 1]
Current density (mA/cm²)
RHE

도면5

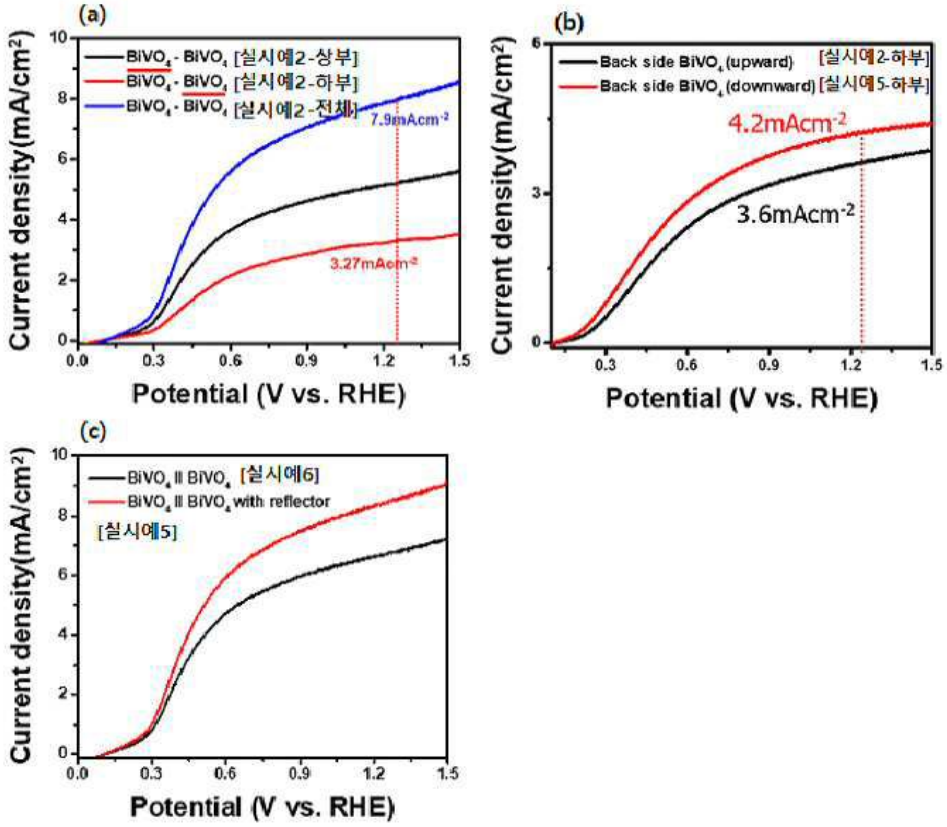


도면6

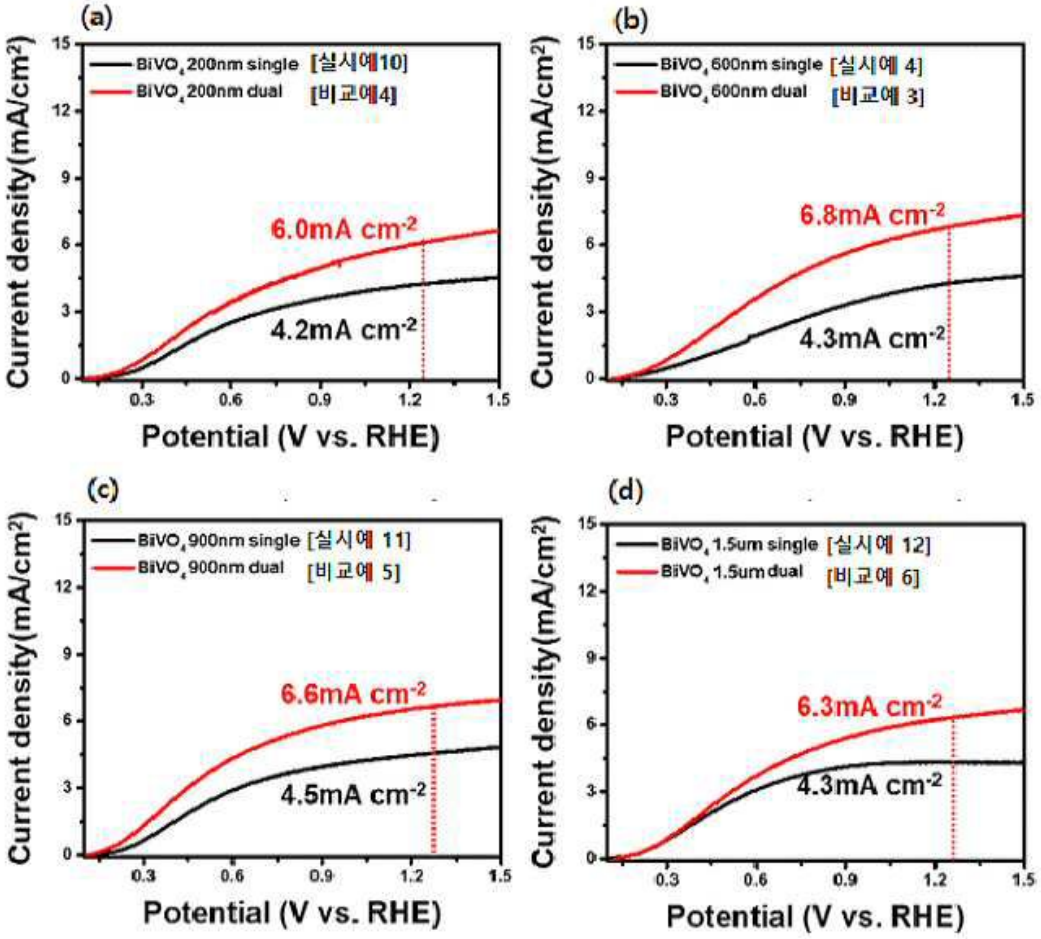


[실시예 2] [실시예 5]

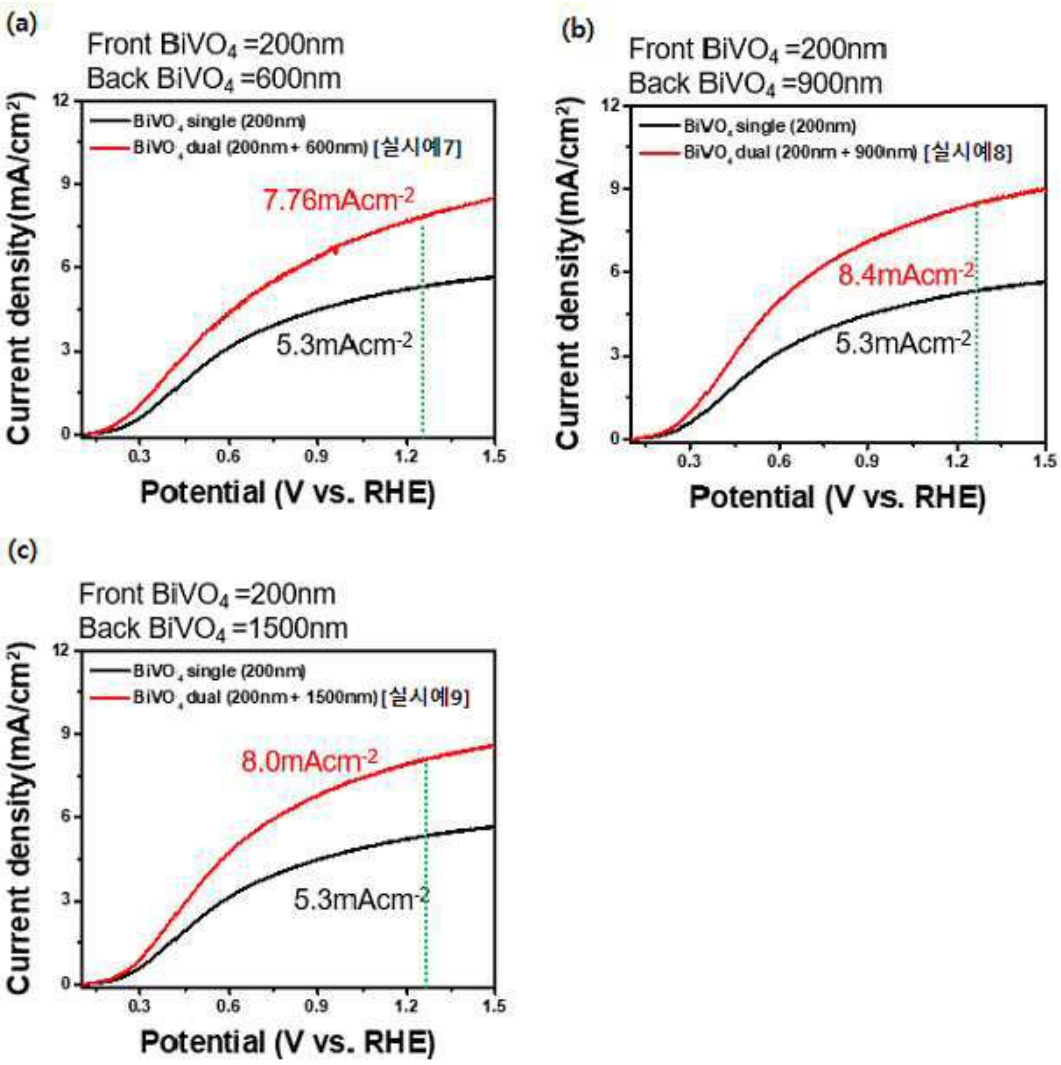
도면7


(a)
BiVO4 - BiVO4 [실시예2-상부]
BiVO4 - BiVO4 [실시예2-하부]
BiVO4 - BiVO4 [실시예2-전체]
7.9mAcm-2
3.27mAcm-2
Current density(mA/cm2)
Potential (V vs. RHE)
(b)
Back side BiVO4 (upward) [실시예2-하부]
Back side BiVO4 (downward) [실시예5-하부]
4.2mAcm-2
3.6mAcm-2
Current density(mA/cm2)
Potential (V vs. RHE)
(c)
BiVO4 ll BiVO4 [실시예6]
BiVO4 ll BiVO4 with reflector
[실시예5]
Current density(mA/cm2)
Potential (V vs. RHE)

도면8


(a)
BiVO4 200nm single [실시예10]
BiVO4 200nm dual [비교예4]
6.0mA cm-2
4.2mA cm-2
Current density(mA/cm2)
Potential (V vs. RHE)
(b)
BiVO4 600nm single [실시예 4]
BiVO4 600nm dual [비교예 3]
6.8mA cm-2
4.3mA cm-2
Current density(mA/cm2)
Potential (V vs. RHE)
(c)
BiVO4 900nm single [실시예 11]
BiVO4 900nm dual [비교예 5]
6.6mA cm-2
4.5mA cm-2
Current density(mA/cm2)
Potential (V vs. RHE)
(d)
BiVO4 1.5um single [실시예 12]
BiVO4 1.5um dual [비교예 6]
6.3mA cm-2
4.3mA cm-2
Current density(mA/cm2)
Potential (V vs. RHE)

도면9


(a)
Front BiVO4 =200nm
Back BiVO4 =600nm
BiVO4 single (200nm)
BiVO4 dual (200nm+ 600nm) [실시예7]
7.76mAcm-2
5.3mAcm-2
Current density(mA/cm2)
Potential (V vs. RHE)
(b)
Front BiVO4 =200nm
Back BiVO4 =900nm
BiVO4 single (200nm)
BiVO4 dual (200nm + 900nm) [실시예8]
8.4mAcm-2
5.3mAcm-2
Current density(mA/cm2)
Potential (V vs. RHE)
(c)
Front BiVO4 =200nm
Back BiVO4 =1500nm
BiVO4 single (200nm)
BiVO4 dual (200nm+ 1500nm) [실시예9]
8.0mAcm-2
5.3mAcm-2
Current density(mA/cm2)
Potential (V vs. RHE)