

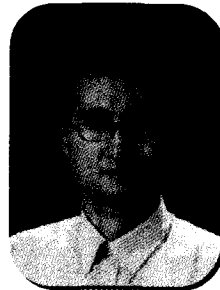
## 실리콘 나노결정 형성 및 응용



· 김종훈 ·  
연세대  
전기전자공학과 박사과정



· 전경아 ·  
연세대  
전기전자공학과 박사과정



· 이상렬 ·  
연세대  
전기전자공학과 부교수

### 1. 서론

실리콘(Si)은 현재 각종 반도체 산업의 근간을 이루는 물질이며 물질 자체의 풍부성과 그동안 축적되어온 공정상의 노하우를 바탕으로 다양한 정보소자에 응용되고 있다. 그러나 간접형 반도체로서 Bulk 상태에서는 k-공간상의 운동량 불일치에 의해 발광 현상을 일으키기 어렵기 때문에 부득이 반도체 발광소자로서는 응용이 미진한 상태에 머물러 있었다. 실리콘에 기반을 둔 광전소자가 개발된다면 지금까지 화합물 반도체가 주를 이루었던 이 분야의 시장구조에 획기적인 변화를 가져올 것이며, 기존의 고밀도 집적회로 구현기술에 직접 응용이 가능하여 생산성과 소자특성의 향상 모두를 한꺼번에 만족시켜줄 수 있는 엄청난 파급효과를 기대할 수 있다. 실리콘의 가시광선 발광은 실리콘 결정이 미세 전자공학에서 주요한 물질로 인식된 1950년대 이후에 지속적으로 연구되어 왔다. 특히 1990년 Canham이 전기화학적으로 에칭된 Si 또는 다공성 Si(ps-Si)에서의 효율적인(1% 이상) 상온 PL을 보고한 이후 별다른 진전을 보이지 않다가 1998년 이후부터 실리콘 발광 연구가 실리콘 나노구조의 양자효과를 이용하며 다시 적극적으로 수행되고 있다[1]. 그러나 다공

성 실리콘은 물질자체의 불안정성과 재현성의 부재 등에 의해 점차 연구의 침체를 보이고 있으며, 최근에는 실리콘 나노결정에 의한 발광이 활발히 연구되고 있는 추세이다.

발광에 대한 정확한 원인은 아직 밝혀지지 않은 상태이나 대체로 양자 구속 효과(quantum confinement effect)와 표면 산화 모델(surface oxide model)에 대한 연구가 가장 큰 설득력을 얻고 있다. 일반적으로 입자의 크기가 점차 축소되어 나노 단위의 구조가 만들어지게 되면 양자 역학적인 개념의 도입이 필요하게 되며, 이러한 나노 단위의 물질 안에서의 특수성은 캐리어들의 양자 구속(quantum confinement)에 의해서 설명될 수 있다. 실리콘 나노 결정은 분자선에 피택시, 화학기상 증착법, 스퍼터링, 이온주입법 등의 증착법으로 형성시킬 수 있음이 최근의 연구에 의해 밝혀지고 있다.

실리콘 나노결정 박막의 제작과 응용기술은 재료의 특성과 기술상의 문제로 여러 가지 어려움을 안고 있다. 즉, 산화와 불순물에 매우 민감하고 발광 효율이 낮으며 정확한 발광 메커니즘이 규명되지 않았다는 문제점이 있다. 특히 펄스레이저 증착법의 경우 고강도의 레이저 빔이 타겟 재료 위에 조사될 때 타겟은 순간적으로 액상과 기상을 거쳐 플라즈마 상

태로 만들어지는데 이러한 기상 플라즈마는 중성 입자들에 비해 입자들의 활동도가 높아 상대적으로 저온에서 증착이 가능하다. 또 레이저빔이 조사되는 국소 영역만을 이온화시켜 타 증착법에 비해 오염이 적으므로 불순물과 구조적 손상에 민감한 실리콘 나노 결정의 증착에 적합하며 분위기 가스 압력, 레이저 에너지 밀도, 기판-타겟 거리 등의 다양한 증착 변수를 조절하여 효과적으로 박막 특성을 변화시킬 수 있다[2].

## 2. 발광 원리

### 2.1 직접형 반도체의 발광원리

플랑크는 가열된 시료로부터의 복사가 에너지의 불연속적인 단위인 양자(quantum) 단위로 방출된다는 것을 관찰하였다. 그때 방출되는 에너지는 로 표시되는데, 는 주파수를 말하며, 는 플랑크상수이다. 플랑크의 가정 후 아인슈타인(Einstein)은 빛의 불연속적인 성질을 증명하는 실험을 통해 금속에서의 전자에 의한 광학적 에너지의 흡수와 흡수된 에너지의 양과 빛의 주파수와 의 관계를 밝혀내었다. 즉, 발광 현상은 물질에 에너지를 가했을 경우 물질의 양자화된 에너지 밴드갭 만큼 빛을 방출하는 것을 말한다. 반도체내에서 발광은 크게 4가지 메카니즘으로 볼 수 있으며, 그것은 엑시톤 재결합(exciton recombination), 대역 간 재결합(band to band recombination), 대역-불순물 전이(band to impurity transition), 그리고 도너-억셉터 재결합(donor-acceptor pair recombination)이다.

#### 2.1.1 엑시톤 재결합

순수한 반도체 결정의 원자들이 밴드갭 에너지 이상의 에너지를 갖는 광자에 의하여 여기 되면 가전자대의 전자는 전도대로 여기 되고 가전자대에는 양으로 대전된 정공이 남게 된다. 이때 정공으로부터 충분히 벗어나지 못하게 여기 된 전자는 정공과 재결합할 수 없는 안정한 상태로 되어 엑시톤을 형성한다. 엑시톤은 상호 쿨롱 인력이 작용하여 수소 원자처럼 전자가 정공 주위를 주위에 대하여 양자화된 에너지 상태로 존재하게 되며 이때 전자와 정공간의

결합을 자유 엑시톤이라 한다. 수소 모형으로 자유 엑시톤의 이온화 에너지는 다음과 같다.

$$E_{ex} = -\frac{\mu e^4}{2h^2 \epsilon^2 n^2}, n=1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_c^*} + \frac{1}{m_h^*} \quad (2)$$

여기서  $\mu$ 는 전자와 정공 쌍의 환산 질량이며, 은 유효 전상수, 은 엑시톤을 나타내는 양자수이다. 전도대의 바닥 에너지를 0으로 할 때 전자와 정공쌍의 정전기적 인력에 의해 자유 엑시톤의 발광 에너지는 밴드갭 에너지보다 만큼 작다. 또한 자유 엑시톤에 의해 방출되는 발광 에너지는 다음과 같다.

$$h\nu = E_g - E_{ex} \quad (3)$$

#### 2.1.2 대역 간 재결합

대역 간 재결합은 전자가 반도체의 전도대역에서 가전자대역으로의 재결합시 나타나는 발광현상으로 반도체의 에너지 밴드갭 만큼의 빛을 방출하며, 이 경우 방출되는 발광 에너지는 다음과 같다.

$$h\nu = E_g \quad (4)$$

#### 2.1.3 대역-불순물 전이

전도대의 전자와 억셉터 준위의 구속된 정공과의 재결합과 도너 준위의 구속 전자와 가전자대의 정공과의 재결합을 말한다. 각각의 방출에너지는 다음과 같으며 여기서 는 도너의 이온화 에너지이며,  $E_D$ 는 억셉터의 이온화 에너지이다.

$$h\nu = E_g - E_D \pm \frac{kT}{2} \quad (\text{donor to valance band}) \quad (5)$$

$$h\nu = E_g - E_A \pm \frac{kT}{2} \quad (\text{conduction band to acceptor}) \quad (6)$$

#### 2.1.4 도너-억셉터 재결합

물질내의 도너 준위와 억셉터 준위가 같이 형성되어 있다면 도너에 구속된 전자와 억셉터에 구속된

표 1. 직접형 반도체 내의 발광 메카니즘 및 방출되는 에너지.

| 발광(전이)메카니즘 | 방출되는 에너지  |
|------------|---|
| 엑시톤 재결합    | $h\nu = E_g - E_{ex}$<br>$E_{ex} = -\frac{m_r^* e^4}{2\hbar^2 \epsilon^2 n^2}, n = 1, 2, 3, \dots$<br>$m_r^{*-1} = m_e^{*-1} + m_h^{*-1}$ |
| 대역 간 재결합   | $h\nu = E_g$  |
| 대역-불순물 전이  | $h\nu = E_g - E_D \pm \frac{kT}{2}$<br>(donor to valance band)  |
|            | $h\nu = E_g - E_A \pm \frac{kT}{2}$<br>(conduction band to acceptor)  |
| 도너-억셉터 재결합 | $h\nu = E_g - E_D - E_A + \frac{e^2}{4\pi\epsilon r}$   |

정공과의 재결합이 나타날 수 있는데 이를 도너-억셉터 재결합이라고 한다. 이 과정에 의한 photon에너지는 다음의 식과 같다.

$$h\nu = E_g - E_D - E_A + \frac{e^2}{4\pi\epsilon r} \quad (7)$$

마지막 항은 도너와 억셉터간의 쿨롱 상호작용을 나타낸다.

### 2.2 엑시톤

엑시톤은 전자가 여기 되어 전자-정공 쌍을 형성하는 것으로 전자, 정공 상호간의 쿨롱 에너지에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 프렌켈 엑시톤 : 강한 결합 엑시톤
- 워니어 엑시톤 : 약한 결합 엑시톤
- 중간 엑시톤 : 결합 에너지가 프렌켈 엑시톤과 워니어 엑시톤의 사이인 엑시톤을 총칭.

반도체 물질과 같이 이동도와 비유전상수가 큰 물질에서의 엑시톤은 워니어 엑시톤으로서 반도체 엑

시톤으로 불리기도 한다. 워니어 엑시톤에서는 전자, 정공 상호간의 쿨롱 에너지가 비교적 작게 작용하여 상호작용을 나타내는 파동함수가 여러 격자에 확장되어 나타난다. 그림 1에 워니어 엑시톤과 프렌켈 엑시톤의 모식도가 나타나있다.

엑시톤의 결합 에너지는 유효 질량 이론에 의해 나타내어질 수 있다. 유효 질량 이론에 의하면 전자, 정공의 상호작용은  $m_e^*$ ,  $m_h^*$ , 비유전상수  $\epsilon$ 로 나타내어진다. 엑시톤의 유효 리드버그 상수  $R_y^*$ 와 유효보어 반경  $a_B^*$ 은 다음과 같다.

$$R_y^* = \frac{\mu e^4}{2\hbar^2 \epsilon^2} \quad (8)$$

$$a_B^* = \frac{\hbar \epsilon}{\mu e^2} \quad (9)$$

이때  $\mu$ 는 앞서 언급한 전자-정공 쌍의 환산 질량이다. 리드버그 상수는  $n=1$ 인 상태로 전자와 정공을 분리시키는 데 필요한 에너지로서 보통 “엑시톤의 기저 상태”라 불리며, 결정의 가장 낮은 여기준위라 할 수 있다. 유효 보어 반지름은 보어 모델에서 수소의 전자가 핵과의 전기적 작용으로 인해 형성하는 원자의 전기적 반지름을 나타낸 것과 같이, 엑시톤의 전자와 정공에 수소원자 모형을 도입하여 그 반경을 구한 것이다.

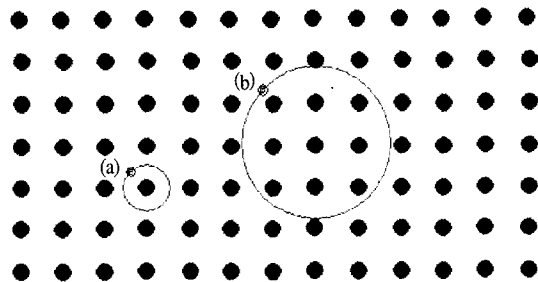


그림 1. (a) 프렌켈 엑시톤 (b) 워니어 엑시톤.

### 2.3 실리콘에서의 발광 메카니즘

Si 박막에서의 주요 발광 메카니즘은 크게 양자구속효과에 의한 발광과 실리콘 산화물 내의 발광성

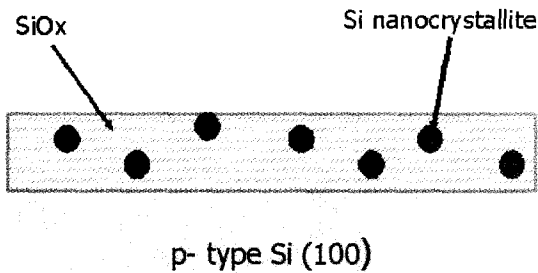


그림 2. 실리콘 나노결정 박막의 구조.

결함 센터에 의한 발광의 두 가지로 알려져 있다[4, 5]. 그림 2는 본 연구실에서 제작한 실리콘 나노결정 박막의 구조도이다.[6]

그림에서 제시한 바와 같이 실리콘 나노결정은 실리콘 산화물 층 내에 산재한 형태로 형성된다. 나노 크기의 결정은 전위 장벽이 높은 기저 물질에 둘러 쌓여있을 때 입자크기의 감소에 따라 양자우물과 같은 양자구속효과를 보(이게 되는데 이것에 의해 밴드갭이 양자화 되어 확장되고, 동시에 캐리어가 위치적으로 구속됨에 따라 불확정성의 원리에 의해 역격자 상에서 캐리어 운동량의 확장을 가져온다. 따라서 간접형 반도체의 특징인 비발광성 재결합이 완화되고 이에 따른 발광 특성이 나타난다. 즉 나노결정의 크기가 엑시톤의 유효보어반경 이하로 감소하게 되면 양자구속효과에 의해 나노 결정 내의 캐리어의 전기적, 광학적 성질이 바뀌게 되며, bulk 상태의 에너지밴드갭 보다 확장된 가시광선 영역의 발광 현상이 일어날 수 있다. 이때 입자크기가 감소함에 따라 에너지밴드갭은 점차 증가하는 경향을 보이므

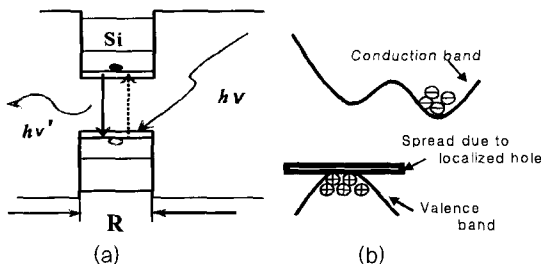


그림 3. 양자 구속 효과의 모식도 (a) 밴드갭의 확장모델 (b) 불확정성의 원리에 따른 운동량 확장모델.

로 양자구속효과를 양자크기효과라고도 한다. 그림 3에 나노결정의 크기와 발광 관계가 실험적으로 관찰되었다. [7]

최근에는 양자구속효과(양자크기효과)와 더불어 다른 발광 메커니즘이 보고 되고 있는데 그것은 그림 5에 제시한 실리콘 산화층(SiOx) 내에 존재하는 발광성 재결합 센터에 의한 것이다. 이것들은 대부분 산소와 관련된 결함에 기인한 것으로 알려져 있다. 산화된 실리콘 기판의 실리콘과 실리콘 산화물 계면 근방에서 관찰되어지는 결함들은 주로 상자성 결함이며, 이는 ESR(electron spin resonance) 측정으로 관측할 수 있다.

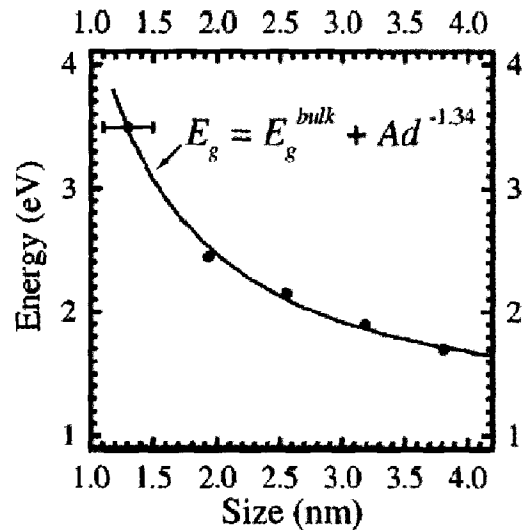


그림 4. 나노결정 크기에 따른 PL 에너지 변화[7].

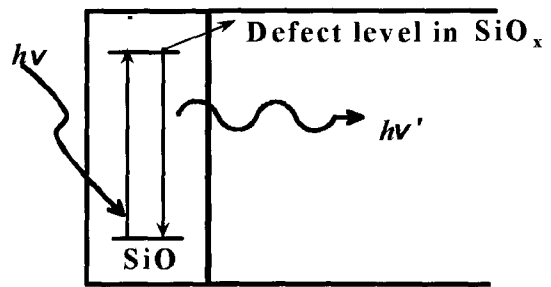


그림 5. 실리콘 산화층 내의 발광성 결함센터에 기반한 발광성 재결합모델.

### 3. 해외 연구 동향

현재 선진 외국의 연구결과는 아래의 표에 정리한 바와 같으나 실리콘 나노결정의 초기 제작 단계에 머무르고 있으며, 양자점 크기와 분포 제어 및 이에 따른 EL 메커니즘의 규명과 고효율 소자제작은 아직 미흡한 실정이다.

표 2. 2000년 이후 국외의 주요 연구 동향.

| 국가   | 연구소                         | 연구 수행 사항                                     |
|------|-----------------------------|--|
| 미국   | Purdue University<br>M.I.T. | 다공성 실리콘 박막의 표면 안정화기술<br>Er 도핑된 실리콘 산화막 EL 소자 |
| 일본   | Matsushita                  | 실리콘 나노 결정에서의 터널링에 의한 EL 특성                   |
| 중국   | Peking University           | 산화 다공성 실리콘 박막에 의한 EL 특성                      |
| 이탈리아 | University of Rome          | 다공성 실리콘을 이용한 waveguide                       |
| 영국   | Solid State Research Centre | 다공성실리콘을 이용한 광전소자                             |
| 독일   | Walter Schottky Institut    | Er이 도핑된 다공성 실리콘에서의 EL 특성                     |
| 이스라엘 | Israel Institute of Metals  | LCVD법을 이용한 실리콘 나노결정에서의 EL특성                  |
| 스페인  | Autonoma de Madrid          | 솔라셀의 다공성 실리콘 코팅의 광학적 특성                      |
| 헝가리  | Res. Inst. Tech. Phys.      | 다공성 실리콘 LED의 동작 메커니즘                         |
| 타이페이 | National Taiwan University  | ITO/SiO <sub>2</sub> /Si구조로 EL 소자 제작         |
| 그리스  | IMEL/NCSR                   | 실리콘 나노 결정 다중막 구조에서의 EL특성                     |
| 프랑스  | GPEC UMR CNRS               | 실리콘 나노 결정의 크기 효과                             |

### 4. 실리콘 나노결정 소자응용

#### 4.1 LED (Light Emitting Diode)

실리콘계 전계발광소자의 작동을 위해서는 실리콘 나노결정에 효과적으로 캐리어를 주입시키는 기술이 중요하며, 이를 위해 전극의 물질 및 구조개선, 기판의 도핑농도 변화, 전기적·광학적 특성 향상을 위한 여러 가지 소자 구조의 제안 등이 요구된다. 실

리콘에서의 전계발광은 이미 여러 연구 그룹에서 보고된 바 있으며, 초기적인 발광 메커니즘이 제시된 상태이다. 대표적인 예로 충돌이온화에 의한 여기 및 재결합이론을 들 수 있다. 캐리어 주입은 대부분 실리콘과 실리콘 산화물 경계면에서 일어나는 터널링에 의존한다. 주입된 전자는 강한 전계에 의해 가속되며 충분히 큰 에너지로 가속된 전자는 가전자대의 전자들에 충돌에 의한 에너지를 공급하여 이들을 발광성 센터 레벨이나 그보다 위인 전도대까지 여기시킨다. 여기된 전자의 일부는 나노결정의 양자구속 효과나 발광성 결함센터에 의하여 발광에 기여하고 나머지는 비발광성 재결합에 의해 에너지를 잃게 된다[8].

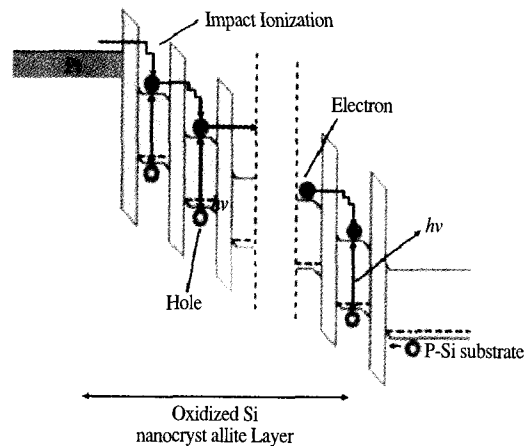
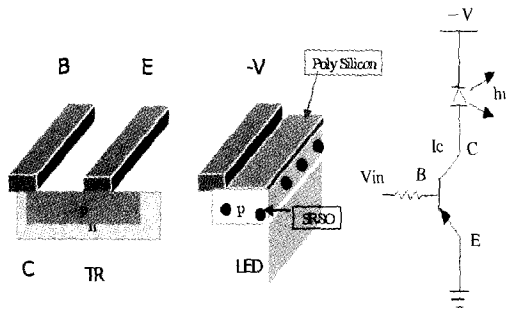
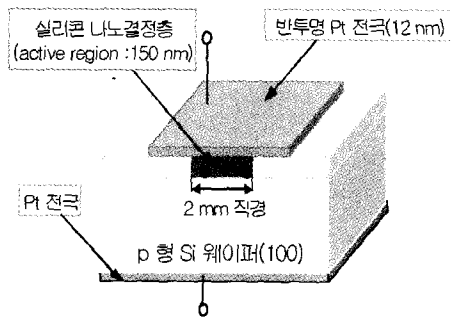


그림 6. 실리콘 나노결정 박막으로 구현한 EL 다이오드의 활성영역에 대한 에너지 밴드 다이어그램[8].

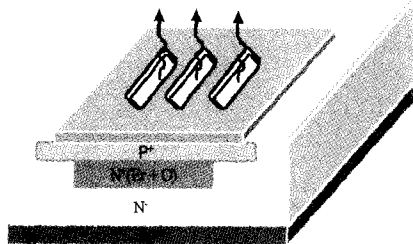
광통신용의 응용은 Er 도핑된 SRSO(Silicon Rich Silicon Oxide) 박막의 연구를 들 수 있다. Er은 1.54 $\mu$ m의 발광파장을 갖는 희토류 원소로서 그 동안 광통신용 광원으로의 연구가 활발히 진행되었다. 그러나 역여기(de-excitation) 현상 등의 문제로 상온에서의 전계발광은 힘든 현실이다. 현재 발광성 Er 센터의 수를 증가시키기 위하여 산소 및 플루오르와 같은 ligand를 동시에 도핑하거나 host 물질의 밴드갭을 증대시키려는 노력이 진행 중이다. 실리콘 나노결정 박막은 Er 센터의 역여기 현상을 막아 상온 전



(a) 실리콘 발광 집적 소자 구조 및 회로도



(b) 전계 발광 소자 구조



(c) 도핑 기술 최적화로 Er doped 실리콘 LED 구조 : 1.54 $\mu$ m

그림 7. 여러 가지 실리콘 발광소자의 구조.

계발광의 효율 향상에 기여할 수 있다[9]. 펄스레이저 증착법은 Er의 도핑농도를 타겟의 혼합비와 동일하게 제어할 수 있으므로 효과적인 연구 방법이 될 것으로 사료된다.

#### 4.2 SET(Single Electron Tunneling device)

단전자 소자는 1986년 모스크바 대학의 D.V. Averin과 K.K. Likharev에 의해 기존의 반도체 소자

를 대체할 소자로서 처음 제안되었다[10]. 기존의 반도체 소자와는 달리 단전자 소자는 터널 효과에 그 기반을 두고 있다. 작은 양자점의 경우 입자가 터널링될 때 전자의 전하의 불연속성을 강하게 보여주는 현상이 나타난다. 전자가 양자점으로 전극으로부터 옮겨지면서 정전 퍼텐셜에서의 변화를 가져오는 전극의 전하의 재배열이 발생한다. 이 때 퍼텐셜 에너지의 변화가 열 에너지  $kBT$ 보다 훨씬 큰 경우 전자 하나의 이동에 대한 정전 에너지 변화로 인해 에너지 스펙트럼에 갭이 형성된다. 이로 인해 양 전극에 가해진 전압이 충전 에너지를 극복할 때까지 전자의 터널링이 제한되는 현상을 쿨롱 차폐라 한다. 이를 이용하여 단전자 메모리소자 및 단전자 트랜지스터에 응용하려는 연구가 진행 중이며, 펄스레이저 증착법에 의한 실리콘 나노결정의 자발적 성장이 보다 균일하고 우수한 분포 및 밀도를 가질 수 있도록 제어하는 기반기술의 개발이 시급한 실정이다.

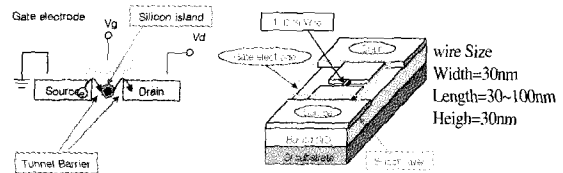


그림 8. 일반적인 단전자 메모리 소자의 구조.

#### 4.3 BSE(Ballistic electron Surface-Emitting display)

최근에 N. Koshida 등에 의해 처음으로 다공질 다결정 실리콘 나노구조의 전계 방출 특성이 보고되었다[11]. 이는 그림 9에서처럼 유리 기판위에 두개의 전극과 나노 결정을 함유한 다공질 폴리 실리콘 구조를 갖는데, 기존의 FED(Field Emission Display)의 음극으로 사용될 수 있다. 전압이 인가되면 전자의 평균 자유 행정보다 짧은 나노결정 내를 ballistic transport 하게 되어, 전자가 나노결정을 통과하는 동안 거의 분산되지 않은 채 표면의 수직인 방향으로만 운동하게 되며, 동시에 낮은 저항의 결정 내부와 높은 저항의 외부 산화막을 통과하면서, 결과적으로 그림 10에서처럼 가속되게 된다. 기존의 FED는 텅

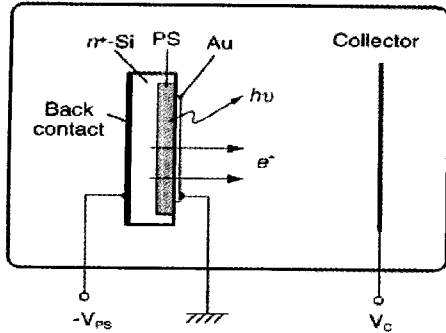


그림 9 실리콘 나노 전자방출표시소자[12].

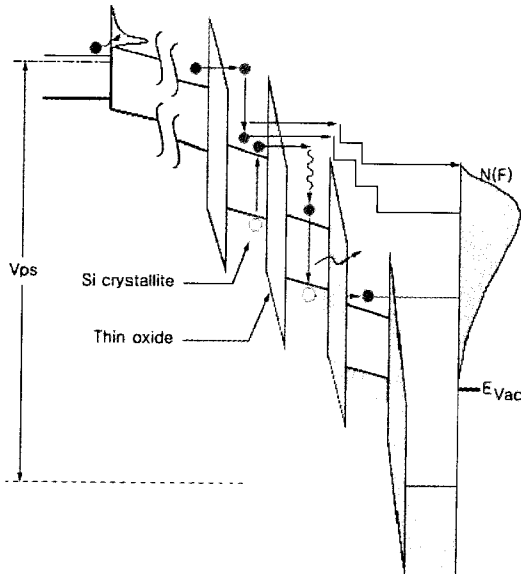


그림 10. 전계가 인가되었을 때 PS 다이오드에서 전자방출[12].

형 음극으로 대면적화가 어렵고, 팁의 끝부분이 반응이나 스퍼터링 등에 의해 열 및 기계적으로 손상되는 단점을 가지고 있다. 그러나 실리콘 나노결정을 이용한 BSE를 평판 디스플레이에 사용할 경우 대면적화의 문제가 쉽게 해결될 수 있음은 물론이고 낮은 진공도에서 동작이 가능하여 저가격화가 가능하다는 장점을 제공할 수 있다. 아직 초기 단계에 있는 BSE의 연구는 전극 구조 개선 및 물질 변화, 나노결정 층의 두께 감소 등의 방법을 통해 전자 방출 구

동 전압을 낮추어 실제 평판 디스플레이 소자로 사용되기에 부족함이 없는 효율 증대가 필요하다.

## 5. 결론

실리콘 나노결정 박막은 간접형 반도체인 실리콘 으로부터 발광을 얻어내어 값싸고 유용한 발광소자로의 활용 가능성을 제시한다. 더욱이 원료자체의 가격 경쟁력이 탁월하고 공정이 상대적으로 단순하며, 기존의 실리콘 기반 집적소자에 직접적으로 응용이 가능하다. Si 박막에서의 주요 발광 메커니즘은 크게 실리콘 나노결정의 양자구속효과에 의한 발광과 실리콘 산화물 내의 발광성 결함 센터에 의한 발광의 두 가지로 알려져 있다. 나노 크기의 초미세 결정이 영차원적 전위장벽에 포위되는 경우 쿨롱 차폐현상이나 발광 현상 등 양자 효과에 기인한 여러 가지 특이할 만한 물리적 현상을 보여주며 이를 전자 소자에 이용하려는 다각적인 연구가 활발히 진행되고 있다. 디스플레이 및 광통신용 광원, 전자 방출 소자, 단전자 메모리소자 등에 응용하기 위해서는 결함 센터의 역할을 규명하고 실리콘 나노결정의 크기와 밀도 분포를 효과적으로 제어하기 위한 나노테크 기반기술의 연구가 심도 깊게 진행되어야 할 것이다.

## 참고 문헌

- [1] L. T. Canham, Applied Physics Letters, Vol. 57, p. 1046, 1990.
- [2] N. Suzuki, T. Makino, Y. Yamada, T. Yoshida, and S. Onari, Appl. Phys. Lett., Vol. 76, p. 1389, 2000.
- [3] F. Henneberger, J. Plus, Optics of Semiconductor Nanostructures, Akademie Verlag, 1993.
- [4] Jong Hoon Kim, Kyung Ah Jeon, Jin Baeck Choi, and Sang Yeol Lee, Materials Science & Engineering B, Vol. 89, p. 70, 2002.
- [5] Jong Hoon Kim, Kyung Ah Jeon, Jin Baeck Choi, and Sang Yeol Lee, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 41, p. 514, 2002.
- [6] Jong Hoon Kim, Kyeong Ah Jeon, and Sang yeol

Lee, Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 15, p. 75, 2002.

[7] H. Takagi, H. Ogawa, Y. Yamazaki, A. Ishizaki, and T. Nakagiri, Applied Physics Letters, Vol. 56, p. 2349, 1990.

[8] T. Yoshida, Y. Yamada, and T. Orii, J. Appl. Phys., Vol. 83, No. 10, p. 5427, 1998.

[9] S. Komuro, S. Mruyama, T. Morikawa, X. Zhao, H. Isshiki, and Y. Aoyagi, Appl. Phys. Lett., Vol. 69, p. 3896, 1996.

[10] D. D. Averin, K. K. Likharev, J. Low Temp. Phys., Vol. 62, p. 345, 1986.

[11] N. Koshida, T. Ozaki, X. Sheng, and H. Koyama, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 34, No. 6A, p. L705, 1995.

[12] N. Koshida, X. Sheng, and T. Komoda, Appl. Surf. Sci., Vol. 146, p. 371, 1999.

**성명 : 이 상 렬**

❖ 학 렬

- 2001년 연세대 기계전자공학부 공학사
- 1986년 연세대 대학원 전기공학과 공학사
- 1990년 State Univ. of New York at Buffalo (MS)
- 1992년 State Univ. of New York at Buffalo (Ph. D)

❖ 경 렬

- 1989-1992년 New York State Institute on Superconductivity 연구조교
- 1992-1995년 한국전자통신연구원 선임연구원
- 1995-현재 연세대 전기전자공학과 부교수

· 저 · 자 · 약 · 렬 · . . . . .

**성명 : 김 종 훈**

❖ 학 렬

- 2000년 연세대 기계전자공학부 공학사
- 2002년 연세대 대학원 전기전자공학과 공학석사
- 2002년-현재 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

**성명 : 전 경 아**

❖ 학 렬

- 2001년 연세대 기계전자공학부 공학사
- 2003년 연세대 대학원 전기전자공학과 공학석사
- 2003년-현재 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

