

## 단결정 실리콘 TFT 제작을 위한 SLS 공정

이운재, 박정호  
고려대학교 전기공학과

## Sequential Lateral Solidification Process for Fabrication of Crystalline Silicon Thin Film Transistor

Youn Jae Lee, Jungho Pak  
Department of Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - This paper presents a low temperature excimer-laser-crystallization that produces directionally solidified microstructure in Si thin films. The process involves (1) a complete melting of selected area via irradiation through a patterned mask, and (2) a precisely controlled pulse translation of the sample with respect to the mask over a distance shorter than the superlateral growth(SLG) distance. (3) lateral growth extended over a number of iterative steps. Grains that grow continuously to the vertical direction were demonstrated. We discuss sequential lateral solidification principle, experiment.

## 1. 서 론

Active matrix liquid crystal display(AMLCD) 기술에서 핵심이 되는 부분은 thin-film-transistor (TFT) 제작에 있다. 수소화된 비정질 실리콘 박막 트랜지스터(a-Si:H)는 1981년에 상업화가 되었고 현재 까지 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 a-Si:H는 AMLCD에 사용하기에 부적합한 면이 있다. a-Si:H 박막의 경우 grain boundary가 많은데 grain boundary는 trap density로 작용을 해서 trap density가 증가하면 문턱전압이 증가하고 sub-threshold slope이 감소하며 field effect mobility가 감소하고 누설전류가 증가하게 된다. 이를 극복하기 위해 단결정 실리콘 TFT를 제작하기 위한 노력이 이루어져 왔다. 기본적으로 TFT 소자가 AMLCD에 적용되기 위해서는 유리기판 위에서 제작이 되어야 하므로 유리기판의 비정질적인 성질을 고려해야하고 유리기판이 손상받지 않을 정도의 낮은 공정온도에서 제작이 이루어져야 한다. 현재 단결정을 얻기 위한 가장 일반적인 방법인 exptaxy는 유리기판의 비정질적인 성질 때문에 적용하기 어려워서 실리콘 결정화에 다음의 방법들이 사용되고 있다.

먼저 비정질 실리콘을 증착하여 온도를 높여서 결정화시키는 방법인 solid phase crystallization (SPC)는 furnace annealing(600°C)이나 RTA를 사용하는데 결정화를 하는데 최소한 600°C 정도의 온도가 요구되므로 공정온도가 높고 결정화 후의 grain 간의 균일도가 나쁜점이 문제가 되고 있다. 1980년대 중반에 Sony Research Group에서 개발된 excimer laser crystallization(ELC) 방법은 유리기판에 적합한 결정화 방법을 사용하고 있고 laser energy에 따라서 다양한 결과를 얻을 수 있다. [1] ELC 방법은 비정질 실리콘 위에 높은 에너지의 laser pulse를 짧은 시간동안 주입함으로써 비정질 실리콘을 결정화시키는 방법인데 실리콘 표면의 온도만 높아지므로 낮은 온도의 공정조건을 요구하는 유리기판에 적합한 방법이다. 그리고 SPC

방법에 비해서 짧은 시간안에 실리콘 박막이 melting과 solidification 과정을 거치므로 비정질 실리콘이 일정한 온도에서 결정화되므로 균일한 결정화를 이룰 수 있다. 그러나 ELC 방법은 laser를 조사하기 위한 processing window가 고정되어 있고 큰 grain 크기를 갖는 미세구조의 제어가 어려워져서 원하는 방향으로 grain boundary가 배열될 수 있다. 이를 극복하기 위해 새로운 ELC 방법의 하나인 artificially controlled superlateral growth (ACSLG)가 사용되었다. ACSLG 방법중의 하나인 sequential lateral solidification (SLS)는 패턴된 마스크 사이로 조사된 laser에 의해서 실리콘 표면을 완전히 녹인 후에 빔을 이동시켜 수평방향으로 확장된 grain을 얻는 방법이다. 이 방법으로 원하는 방향으로 성장하는 grain을 얻을 수 있게 되었다. 본 연구에서는 단결정 실리콘 TFT 제작을 위한 SLS 방법의 원리와 실험결과에 대해서 이야기 하겠다. [1], [2]

## 2. 본 론

## 2.1 SLS의 이론적 배경

원하는 방향으로 grain을 결정 성장시키는 SLS 모델은 다음의 과정을 통해서 해석할 수 있다. 1) 패턴된 마스크를 통해 laser가 조사되고 이 영역의 실리콘이 녹음(액체상태의 실리콘이 형성됨) 2) 마스크에 의해서 laser가 조사되지 않은 부분(고체상태의 실리콘)으로부터 액체 상태의 실리콘으로 결정 성장 3) 위의 과정이 마스크를 SLG 길이보다 작은 거리만큼 이동시키면서 반복됨 4) 수직방향으로 계속해서 결정이 성장됨. [1]

위의 과정 중에서 먼저 첫 번째 과정인 laser에 의해서 실리콘이 녹는 현상에 대해서 분석할 필요가 있다. 비정질 실리콘에 laser를 조사하였을 때 조사되는 에너지의 크기에 따라서 다음의 세 가지 영역으로 나눌 수 있다. 먼저 조사되는 laser의 에너지가 작을 경우 실리콘이 부분적으로 녹는 현상이 발생하고 순간적으로 결정화가 증가한다. 이 에너지 영역은 laser에 의해서 실리콘 박막이 녹는 깊이가 실리콘 박막의 두께보다 작은 영역이므로 산화막과의 경계면 전체에서 녹지 않은 부분이 연속적으로 존재하게 되고 이 부분에서부터 수직방향으로 결정성장이 이루어지고 과도 결정화(explosive crystallization)가 일어나게 된다. 과도 결정화는 일정한 영역의 액체가 결정 성장을 하면서 발생하는 잠열이 바로 옆 영역의 결정화를 유도하는 현상이다. 이 에너지 영역에서는 결정 성장을 유도하는 녹지 않은 영역(고체)이 산화막과의 경계 부분에서 존재하므로 계면에서부터 많은 결정이 성장되고 결국 작은 grain 크기를 가지는 다결정 구조가 발생하고 grain의 크기가 박막의 두께보다 작게 된다.

조사되는 laser의 에너지가 이보다 더 커서 실리콘 박막이 완전히 녹을 수 있는 영역이 되면 superlateral growth 현상이 발생하고 이 영역을 SLG 영역이라고 부른다. 실리콘이 녹는 깊이가 박막의 두께와 비슷하기

때문에 녹지 않은 실리콘 영역이 이산적으로 분포하게 되고 일정한 거리를 두고 녹지 않은 실리콘 영역이 분포하므로 계면과 bulk 영역의 온도에 의존하는 solidification 속도와 고체의 nucleation 비율에 따라서 성장하는 grain이 만나기 전에 수평방향으로 결정이 성장하게 된다. 응고과정을 유도하는 역할을 하는 녹지 않은 부분이 거리를 두고 존재하므로 이 영역들 사이의 거리만큼 수평방향으로 결정 성장하게 되고 결과적으로 이 영역에서  $\mu\text{m}$  단위의 가장 큰 결정구조를 얻을 수 있다.

조사되는 laser의 에너지가 이보다 크게 되면 모든 실리콘 영역이 완전히 녹게 되고 액체 상태의 실리콘에서 nucleation이 발생한다. solidification 시의 냉각율이 크면 고체상태의 실리콘이 급격하게 nucleation 되므로 기판온도가 낮은 경우 급격한 nucleation이 발생하고 결과적으로 수백 A 미만의 grain 크기를 가지는 다결정 실리콘 구조를 가지게 된다. 또 박막의 두께가 얇아 질수록 기판온도에 의한 영향을 많이 받게 되어 비정질화가 촉진된다. 결과적으로 실리콘 영역을 완전히 녹이기 위한 문턱 에너지는 박막 두께가 증가할수록 증가하게 되고 pulse duration이 증가할수록 증가하게 되고 기판 전도도가 증가할수록 증가하게 된다. 위의 내용을 다음의 표 1에서 요약하였다.[5]

표 1. laser 에너지에 따른 비정질 실리콘 박막의 상변화 상태

laser 에너지	박막의 상변화 상태
낮은 에너지 영역	<ul style="list-style-type: none"> <li>산화막 표면에 녹지 않은 부분이 연속적으로 존재 (녹는 깊이 &lt; 박막 두께)</li> <li>과도 결정화, 수직방향의 결정성장</li> <li>작은 grain 크기의 다결정 실리콘 형성</li> </ul>
SLG 영역	<ul style="list-style-type: none"> <li>녹지 않은 영역이 떨어져서 존재 (녹는 깊이 <math>\approx</math> 박막 두께)</li> <li>결정 성장하는 grain이 만나기 전에 수평 방향으로 결정 성장</li> <li><math>\mu\text{m}</math> 단위의 크기를 가지는 결정이 형성됨</li> </ul>
높은 에너지 영역	<ul style="list-style-type: none"> <li>supercooling 후에 nucleation 발생</li> <li>낮은 기판 온도(600°C) 미만에서 비정질 상태의 실리콘 형성 (grain 크기 &lt; 수 A)</li> <li>얇은 박막일수록 비정질 상태가 나타남</li> </ul>

SLG 영역에서는 완전히 액체상태인 영역에서 발생하는 nucleation이 일어나기 전에 고체상태인 영역으로부터 결정성장이 이루어지므로 nucleation이 거의 없이 결정들이 수평방향으로 성장하므로 가장 큰 grain을 얻을 수 있다. 결과적으로 결정화 시 이 영역의 laser 에너지를 사용하게 된다.[3],[4]

SLS 방법에서는 SLG 영역의 laser가 조사되어 녹은 부분의 실리콘이 마스크에 의해서 laser가 조사되지 않은 고체상태의 실리콘 영역에서부터 결정이 성장되는 응고과정을 이용한다. 응고과정 중에 SLG 거리보다 작은 거리만큼을 laser가 이동하면 다음 step에 조사되는 영역이 현재 결정 성장되는 부분과 하나의 grain을 이룰 수 있으며 이 과정을 계속해서 반복하면 빔의 이동 방향으로 계속해서 성장하는 grain을 얻을 수 있다.

## 2.2 실험

SLS process는 비정질 실리콘 위에 패터닝된 마스크를 통하여 laser를 조사함으로써 이루어진다. Laser는 308nm 파장의 XeCl을 사용하였고 그림 1에서 보는

바와 같이 XeCl laser 시스템은 variable lens attenuator, variable field lens, patterned mask, two-element imaging lens를 통하여 sample에 조사된다. 그 후에 submicron 이동 stage가 sample을 이동시키면서 공정을 진행한다.

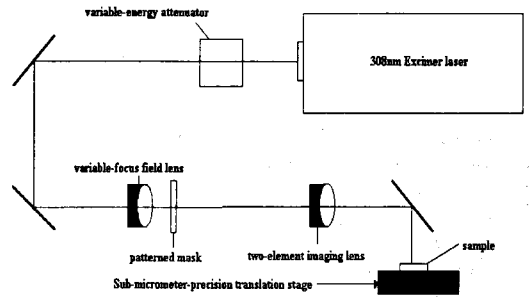


그림 1. SLS process를 위한 projection system

시료는 실리콘 wafer 위에 PECVD oxide를 300°C에서 3000Å 증착하고 비정질 실리콘은 PECVD로 300°C에서 550Å 증착하여 준비하였다.

그림 2에서 보듯이 2 $\mu\text{m}$ 의 폭을 가지는 수평방향의 laser beam을 0.6 $\mu\text{m}$  step/pulse, 0.8 $\mu\text{m}$  step/pulse로 수직방향으로 이동시키면서 조사를 하였고 pulse duration time을 25ns로 하였다. SLS가 진행된 부분의 전체 면적은 2 $\times$ 2cm<sup>2</sup> 이고 조사된 laser의 에너지 밀도는 310mJ/cm<sup>2</sup> 이다.

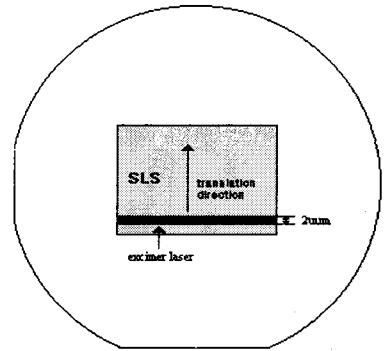


그림 2 SLS process

표 2. SLS process specification

	specification
laser	XeCl, 308nm, 310mJ/cm <sup>2</sup>
sample	oxide 3000Å (PECVD, 300°C) 증착 비정질 실리콘 550Å (PECVD, 300°C) 증착
beam 폭	2 $\mu\text{m}$
translation distance	0.6 $\mu\text{m}$ step/pulse, 0.8 $\mu\text{m}$ step/pulse
pulse duration	25ns
total SLS area	2 $\times$ 2cm <sup>2</sup>

그림 3은 laser가 반복 입사되면서 박막이 손상된 부분의 grain을 보여주고 있다. 처음의 laser가 지나간 후 solidification 되면서 이미 결정성장이 끝난 후에 다시 laser가 조사되어 박막이 타버린 부분으로 grain을 그대로 보여준다고 생각이 된다. 그림으로부터 grain이 빔의 이동 방향으로 계속해서 성장한 것을 알 수 있다. 결정 성장한 grain이 바로 옆의 grain과의 충돌하지 않는다면 수직방향으로 계속해서 성장할 것으로 생각이 된다.

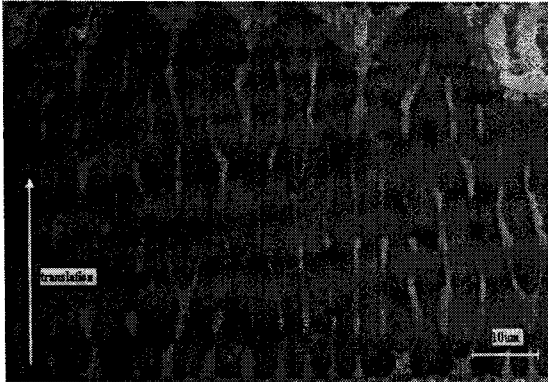


그림 3 laser가 반복 입사된 박막의 grain

위의 그림과 같은 grain을 가지는 박막에 수직방향으로 소스와 드레인이 배열된 TFT 소자를 제작할 경우 수직방향으로의 grain boundary가 거의 존재하지 않을 것이고 따라서 수직 방향으로 이동하는 운반자는 단결정 실리콘과 비슷한 이동도를 가지고 이동할 것이다.

### 3. 결 론

지금까지 sequential lateral solidification (SLS)의 이론적인 내용과 SLS 방법을 이용한 실험 내용 그리고 SLS를 진행한 박막의 grain에 관해서 이야기를 하였다. SLS 방법은 종전의 결정화 방법인 epitaxy, SPC, ELC 방법에 비해서 유리기관에 적용할 수 있는 저온공정에 적합한 방법이고 단결정 실리콘과 거의 유사한 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다. SLS 공정을 진행한 결과 그림 3에서와 같이 수직방향으로 계속해서 성장하는 실리콘을 얻을 수 있었으며 이를 수직방향의 소스, 드레인 영역을 가지는 TFT 소자에 적용해서 단결정 실리콘 TFT와 거의 유사한 특성을 가지는 소자를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] James S. Im and Robert S. Sposili "Crystalline Si films for Integrated Active-matrix Liquid-Crystal Display," *Mrs Bulletin*, pp. 39-48, March, 1996.
- [2] James S. Im and Robert S. Sposili, "Sequential Lateral Solidification of Thin Films on SiO<sub>2</sub>," *Appl. Phys. Lett.*, **69** (19) pp. 210-213, 4 November 1995.
- [3] James S. Im and H. J. Kim, "Phase Transformation Mechanisms Involved in Excimer Laser Crystallization of Amorphous Silicon films," *Appl. Phys. Lett.*, **63** (14), pp. 1969-1971, 25 October 1993.
- [4] James S. Im and H. J. Kim, "On the Super Lateral Growth Phenomenon Observed in Excimer Laser-Induced Crystallization of Si Films," *Appl. Phys. Lett.*, **64** (17), pp. 2303-2305, 25 April

- 1994.
- [5] James S. Im and H. J. Kim, "On the Super Lateral Growth Phenomenon Observed in Excimer Laser-Induced Crystallization of Si Films," *Appl. Phys. Lett.*, **64** (17), pp. 2303-2305, 25 April 1994.