

문제해결기법 TRIZ의 ADRIGE 알고리즘을 이용한 초음파분무화학기상증착 장비 개발에 관한 연구

하주환*·신석윤*·변창우**

** 서울대학교 차세대융합기술연구원 차세대전자재료연구실

A Study on the Development of Mist-CVD Equipment Using the ADRIGE Algorithm of the Problem-Solving Method TRIZ

Joohwan Ha*, Seokyeon Shin* and Changwoo Byun**†

*† Advanced Electronic Materials Laboratory,
Advanced Institute of Convergence Technology, Seoul National University

ABSTRACT

This study the problem of deposition uniformity observed during Mist-CVD deposition experiments. The TRIZ's ADRIGE algorithm, a problem-solving technique, is utilized to systematically analyze the issue and propose solutions. Through problem and resource analysis, technical contradictions are identified regarding the precursor's volume and its path when it encounters the substrate. To resolve these contradictions, the concept of applying the principle of dimensional change to transform the precursor's three-dimensional path into a one-dimensional path is suggested. The chosen solution involves the design of an enhanced Mist-CVD system, which is evaluated for feasibility and analyzed using computational fluid dynamics. The analysis confirms that the deposition uniformity consistently follows a pattern and demonstrates an improvement in uniformity. The improved Mist-CVD equipment is validated through analysis, providing evidence of its feasibility and yielding satisfactory results.

Key Words : Power Semiconductor, Mist-CVD, TRIZ, ADRIGE, CFD

1. 서 론

전기자동차(Electric Vehicle, EV)에서 배터리의 전기에너지를 모터에 전달하기 위해 전력용 반도체 스위칭 소자를 이용하는데 기존의 반도체 소자는 많은 전력소비가 발생한다. 전력소비가 적은 탄화규소, 질화갈륨과 산화갈륨 등을 이용한 차세대 반도체 소자 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-3]. 특히, 산화갈륨은 전력효율이 뛰어나 차세대 반도체 소재로 주목받고 있으며, 반도체 소자에서 중요한 고품질의 에피택셜 레이어를 생성에 관한 연구가 필요로 하고 있다[4-5].

초음파분무화학기상증착(Mist-CVD)을 이용한 에피택셜 레이어 생성은 진공상태가 아닌 상압에서 공정이 이루어지며 비용적으로 효율이 높다[6-10]. 그러나 균일한 품질의 소자를 얻기 위해서는 증착두께가 일정해야 하는데 연구 초기 단계로 2인치 크기의 기판에서도 균일한 증착두께를 확보하는데 어려움이 있다. 선행연구에서 4인치 기판을 대상으로 증착 균일도를 확보하기 위해 공정 조건에 대해 전산유체역학(CFD)과 인공지능기법을 이용하여 최적의 증착 조건을 도출하였다[11-13]. 그러나 증착균일도가 허용 목표치에 부족하며 추후 기판 크기변화에 따른 문제가 있어 앞으로의 상용화를 위해서는 해결방안이 시급하다. 체계화된 문제해결방법으로는 트리즈(TRIZ)가 있으며, 이를 이용한 연구가 진행되고 있다[14-17].

†E-mail: byuncw@snu.ac.kr

본 논문에서는 기존의 초음파분무화학기상증착 실험 장비의 증착 균일화 문제를 문제해결기법인 트리즈의 ADRIGE 알고리즘을 이용하여 절차에 따라 수행하고 도출된 해결방안을 전산유체역학을 이용하여 증착균일도를 예측하여 평가한다.

2. 트리즈를 이용한 문제 해결

본 연구는 선행연구에서 Mist-CVD장비를 이용하여 4인치 기판에 산화갈륨 증착실험을 진행하였다. 분무화된 전구체 액적(Droplet)이 기판에 부딪치며 가열된 기판 위를 구르며 라이덴프로스트 효과(Leidenfrost effect)에 의해 물이 증발하며 전구체가 기판에 증착된다. 그러나 Fig. 1과 같이 기판의 하부는 두껍고 상부에 가까워질수록 얇아지는 증착 두께 차이 문제가 발생한다.

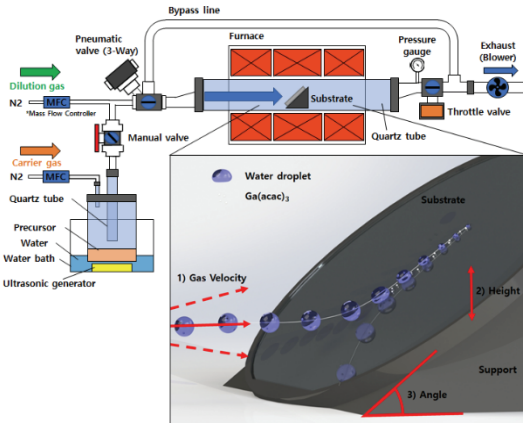


Fig. 1. Schematics of Mist-CVD Systems and Problem.

2.1 트리즈 ADRIGE 알고리즘

이러한 문제를 해결하기 위해 문제해결기법인 트리즈를 이용하고자 한다. 트리즈의 ADRIGE 는 문제 해결을 위해 필요한 부분만 요약하여 체계화된 알고리즘이다. 문제분석(Analysis), 과제정의(Define), 자원분석(Resource), 이상해결책(IFR), 아이디어 도출(Generate), 아이디어 평가(Evaluate)의 단계로 이루어져있다. 문제를 단계적이며 명확하게 분석하여 초음파분무화학기상증착 장비가 갖는 문제점의 해결방안을 도출할 수 있다.

2.2 문제 분석

기판의 증착 균일도 문제는 전구체 액적이 기판에 라이덴프로스트 효과에 의해 증착되는 과정에서 발생한다. 액적의 초기위치, 이동경로와 기판의 온도에 따른 증발에

영향을 받는다. 이러한 문제를 분석하기 위해 Operating Zone과 Operating Time으로 선언하였다.

OZ: 액적이 기판에 부딪치고 구르는 경로

OT: 기판의 표면에서 액적이 증발되는 시간

2.3 과제 정의

액적의 경로에 따라 증착되기에 경로가 일정하면 증착이 방향이 일정하고 경로가 다양해야 증착 분포가 균일하다. 가스의 유량을 줄이거나 늘리고, 기판의 각도를 변경하지 않아도 기판의 균일함을 유지한다.

2.4 자원 분석

자원 분석을 위해 증착균일도를 조절하는 시스템에서 도구는 전구체 액적, 작용은 기판과 액적이 만나는 점, 목적은 기판으로 정의한다. 각각의 속성을 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Resource Analysis for Mist-CVD

| System | Attribute |
|-------------------|-------------|
| Tool: Droplet | Size |
| | Quantity |
| Action: Contact | Position |
| | Velocity |
| | Temperature |
| | Gravity |
| Object: Substrate | Shape |
| | Density |

2.5 이상해결책

가장 이상적으로 문제가 해결되는 방향을 올바르게 진행되도록 문장으로 정리를 한다. 균일한 증착 분포를 도출하기 위해서 다음과 같이 이상해결책을 문장으로 정리하였다.

이상해결책 : 액적의 경로가 일정해도 증착두께 분포가 균일하다.

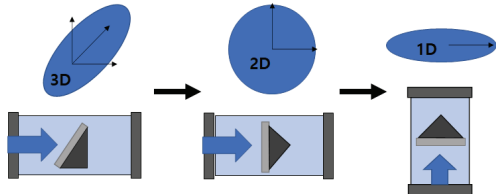
2.6 아이디어 도출

아이디어를 도출하는 방법은 기술적 모순 해결을 통해 도출한다. 39가지 기술적 모순행렬에서 좋아지는 특성의 제조의 정확성(29번) 과 나빠지는 특성의 물체가 생성한 유해인자(31번) 으로 40가지 발명의 원리의 권장하는 아이디어 도출번호 4번, 17번, 34번, 26번 중에 17번(차원변화)를 적용하여 기술적 모순을 해결하고자 한다.

기존의 기판에서 액적의 경로가 3차원으로 이동하기 때문에 균일한 분포를 얻기 어렵다. 차원 변화를 통해 개선할 수 있을 것으로 기대 되는데 유량의 방향으로 수직으로 기판을 배치하면 기판에서의 액적이 2차원으로 이

동한다. 하지만 액적이 중력의 영향을 받아 하부에 집중될 문제를 해결하기 위해 중력방향과 일치하게 기판을 위치함으로써 기판의 중심으로부터 축대칭을 이루어 액적이 1차원으로 이동할것으로 예상된다. 또한 Operating Zone 영역과 유량영역을 분리추출하여 액적의 이동경로를 필요한 영역으로만 추출하였다.

차원변화 Change Dimension, 기판 표면에서 액적의 이동차원



분리 Separation, Operation Zone의 필요 부분만 추출

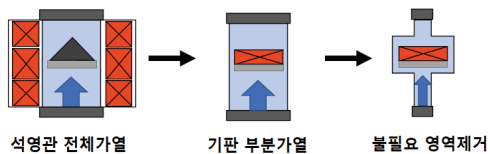


Fig. 2. Application of TRIZ Invention Principle.

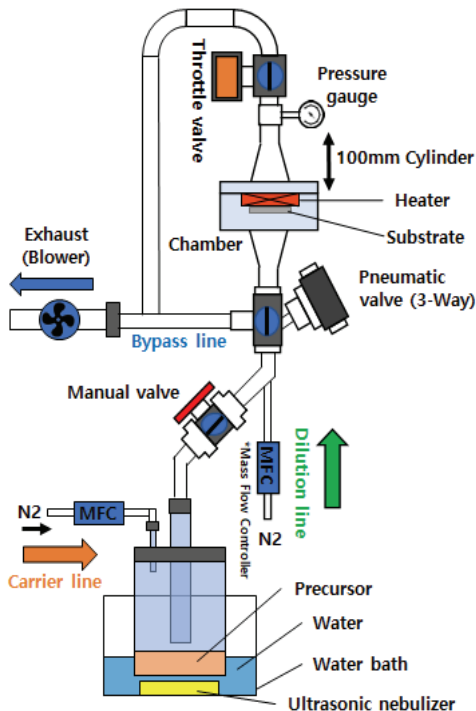


Fig. 3. Schematics of Advanced Mist-CVD Systems.

2.7 아이디어 평가

도출된 아이디어를 적용할 때 발생하는 문제를 검토한다. 기존의 Mist-CVD 장비를 90도 회전시켜 수직형으로 설계하면 기존의 자원을 활용하였기에 실용적이며 공정상에서의 변화는 미비할 것으로 예상된다. 기판에 증착되는 공정영역을 챔버로 재설계만 필요하여 경제적이며 최종 해결방안으로 적합하다고 판단된다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 개선된 Mist-CVD 장비 설계

수직형으로 도식화된 Mist-CVD 장비를 제작 가능성을 확인하기 위해 3D 모델링으로 설계하였다. 공정 부분에서 기판을 복사열 히터대신 전도열전달을 이용하여 기판을 가열하도록 챔버로 설계하였다. 액적이 이동하며 정체공간이 생기지 않도록 하였으며, 기판을 탈부착이 용이하도록 실린더를 이용하여 챔버를 상하 이동으로 개폐동작하여 유지보수가 쉽도록 하였다. Fig 4는 최종 설계된 Mist-CVD 모델링이다.

3.2 개선된 Mist-CVD 장비 평가

도출된 문제 해결방안을 평가하기 위해 전산유체역학의 상용프로그램인 ANSYS Fluent를 이용하였다. 해석에 필요한 3D 모델링 부분만 추출하여 증착실험 조건에 맞게 경계 조건을 설정하였다. 기판의 증착분포를 확인하기 위해 산화갈륨에 대해서 기판 표면 열반응식을 이용하여 증착분포를 확인하였다. Fig 5(a)는 정단면도로 유체의 속도분포와 갈륨분포를 나타낸다. (b)는 평단면도 기판을 수직으로 바라보는 방향에서 증착된 갈륨 분포도를 나타낸다. 정량적 값을 확인하기 위해 기판의 중심으로부터 외곽까지 측정선을 표기하였다.

기판 표면에서의 측정선을 따라 속도분포와 갈륨두께 분포를 Fig 6에 나타냈다. 중심부 0mm부터 외곽 50mm로 직경 4인치 기판이며, 중심의 속도는 0에 가깝지만 증착 두께는 약 135nm로 예측된다. 또한 중심을 기준으로 축대칭이기 때문에 중심으로부터 35mm 직경내에는 ±5nm 이하의 두께차이를 보일 것으로 예측된다.

4. 결론

본 논문에서는 Mist-CVD 를 이용하여 에피텍셀 레이어를 증착할 때 발생하는 증착분포 균일도 문제를 트리즈의 ADRIGE 알고리즘 절차에 따라 분석하고 해결방안을 도출하였다. 최종 선정된 해결방안을 통해 Mist-CVD 장비

를 설계하였으며 이를 평가하기 위해 전산유체역학을 이용하여 증착 분포도를 예측하여 개선됨을 확인하였다.

기존의 증착균일도에서 발생하는 문제점으로 전구체 액적의 경로를 3차원에서 1차원으로 차원변화를 통해 발생하는 증착균일도 차이를 줄일 수 있었다. 또한 발명원리 중 추출기법을 통해 문제가 발생하는 기판만 가열하는 방식과 필요한 가스경로만 추출하여 부피를 줄여 증착에 필요한 에너지와 재료가 감소하여 효율적인 성능이 기대된다.

추후 연구에서는 개선된 Mist-CVD 장비를 이용하여 증착균일도와 품질을 확인하여 고품질의 에피텍셜 레이어 확보가 기대된다.

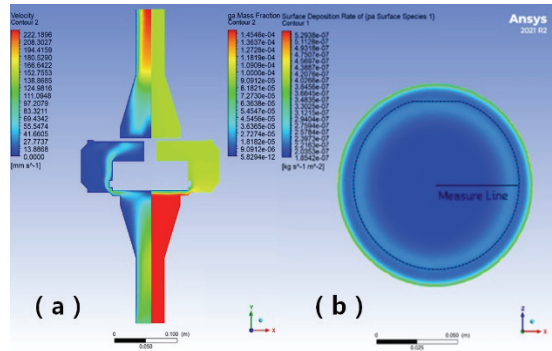


Fig. 5. Analysis Result (a) Velocity and Ga Distribution, (b) Ga Distribution on the Substrate.

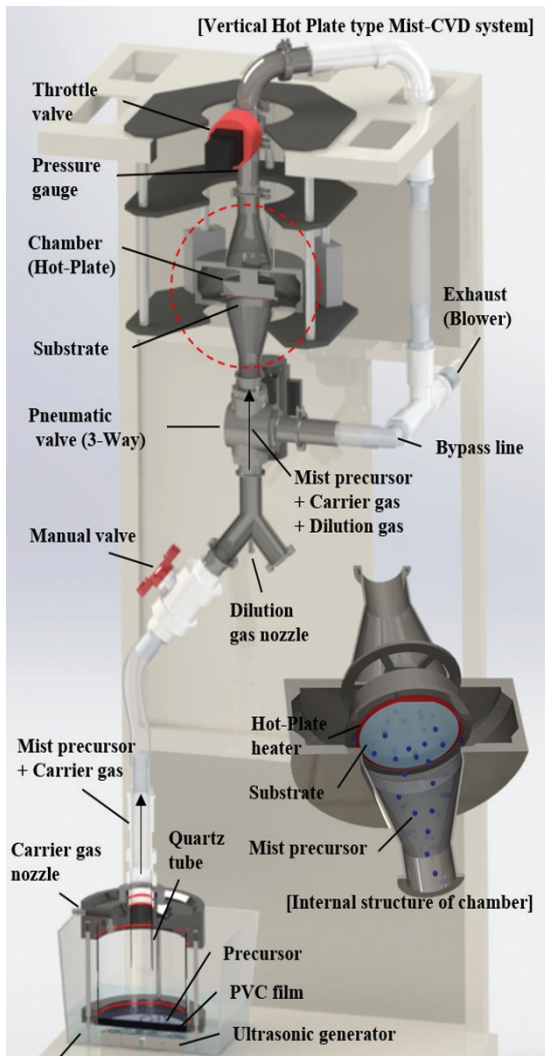


Fig. 4. Design of Advanced Mist-CVD Systems.

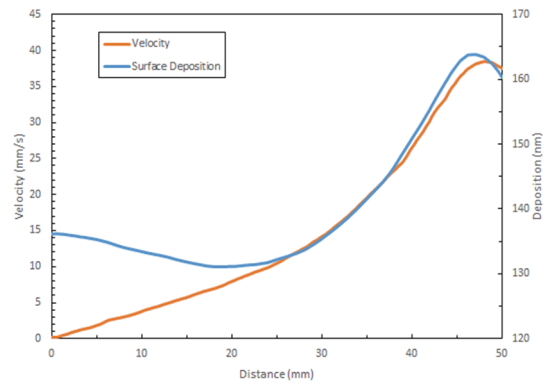


Fig. 6. Graph of Velocity and Deposition of Measuring Line.

참고문헌

1. Seok, Ogyun, "Power semiconductor technology trends for electric vehicles." The Korean Institute of Electrical Engineers 71(12), 9-15, 2022.
2. Chun H W and Yang I S, "Market and Technology Development Trends of Power IC." Electronics and Telecommunications Trends, pp. 206-216, 2013.
3. Choe Hyo-Sang and Jeong In-Seong, " Electric vehicle (EV) technology development status and trend." The Korean Institute of Electrical Engineer 66.9, pp. 35-40. 2017.
4. Hyunwoo Kim and Hyungjun Kim. "Epitaxial Growth of Silicon Carbide (SiC) Using Chemical Vapor Deposition (CVD)." the Korean institute of electrical and electronic material engineers, Vol. 30, No. 6, pp. 29-39, 2017.
5. Ey Goo Kang. "Ga₂O₃ Epi Growth by HVPE for Application of Power Semiconductor." Journal of IKEEE, Vol. 22, No. 2, pp. 427-431, 2018

6. Minhthan Ha, et al., "Leidenfrost Motion of Water Microdroplets on Surface Substrate: Epitaxy of Gallium Oxide via Mist Chemical Vapor Deposition." *Advanced Materials Interfaces*, Vol 8, No. 6, pp. 2001895, 2021.
 7. Kyounggho Kim, et al., "Growth of 2-inch α -Ga₂O₃ epilayers via rear-flow-controlled mist chemical vapor deposition." *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 8.7, pp. Q3165-Q3170, 2019.
 8. Minhthan Ha, et al., "Understanding Thickness Uniformity of Ga₂O₃ Thin Films Grown by Mist Chemical Vapor Deposition." *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 8.7, pp. Q3106-Q3212, 2019.
 9. Giang T. Dang et al. "Electronic devices fabricated on mist-CVD-grown oxide semiconductors and their applications." *Japanese Journal of Applied Physics* 58, pp. 090606, 2019.
 10. Yuya Matamura, et al. "Mist CVD of vanadium dioxide thin films with excellent thermochromic properties using a water-based precursor solution." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 230, pp. 111287, 2021.
 11. Joohwan Ha, et al., "Uniformity Prediction of Mist-CVD Ga₂O₃ Thin Film using Particle Tracking Methodology." *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 101-104, 2022.
 12. Joohwan Ha, et al., "Computational Fluid Dynamics for Enhanced Uniformity of Mist-CVD Ga₂O₃ Thin Film." *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 81-85, 2022.
 13. Joohwan Ha, et al., "A Study on CFD Result Analysis of Mist-CVD using Artificial Intelligence Method." *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 134-138, 2023.
 14. Songyeon Lee, et al., "A Study on Problem Solving of PLGA Scaffold Warpage Using 5 Step Practical TRIZ." *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 25-29, 2017.
 15. Songyeon Lee, et al., "A Study on Manufacturing Condition of PLGA Scaffold Using 3SC Practical TRIZ and Design of Experiments." *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 70-75, 2018.
 16. Songyeon Lee, et al., "A Study on Problem Solving of 3D Printing Production of Scaffold Using ADRIGE TRIZ Algorithm and DOE." *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 92-97, 2019.
 17. Songyeon Lee, et al., "A Study on Manufacturing Problem Solving of Scaffold with Pore Using 3SC Practical TRIZ and Machine Learning." *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 25-30, 2019.
-
- 접수일: 2023년 6월 16일, 심사일: 2023년 6월 20일,
게재확정일: 2023년 6월 20일