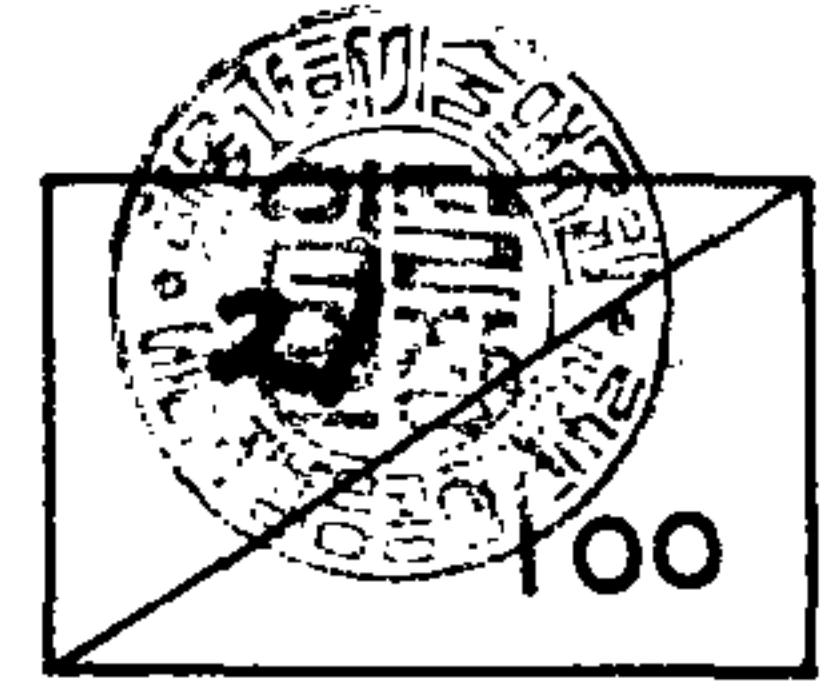


제 1 차 년 도
연 차 보 고 서



공업화 공정기술 개발

대면적 박막제조공정기술 개발

A Study on Large Area Thin Film Deposition

연구기관
한국과학기술연구원

과 학 기 술 처

제 출 문

과학기술처장관 귀하

본 보고서를 “공업화공정 기술개발”사업의 세부 과제인 “대면적 박막제조기술개발”연구 과제의 보고서로 제출합니다.

1992. 4.

주관연구기관 : 한국과학기술연구원

연구책임자 : 박달근(에너지·반응공정연구실 책임연구원)

연구원 : 이중기(에너지·반응공정연구실 연구원)

우주만(에너지·반응공정연구실 연구원)

여 백

요 약 문

I. 연구목적

대면적 박막제조 기술개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

박막은 반도체소자, 광·자기 기록매체, 평판표시기기, 태양전지, 각종 센서 등 여러가지의 기술집약적인 제품의 핵심을 이루고 있다. 원료물질로부터 적절한 방법에 의해 원하는 형태, 조성 및 물성을 가진 박막을 제조하는 것이 기술의 핵심인데, 기판의 크기가 커지면 박막제조공정기술의 중요성도 증대한다. 국내의 박막제조공정기술의 기반은 아직도 취약하여 첨단제품 생산용은 외국에서 설비를 도입하는 경우가 일반적이다. ULSI, 평판표시기기, 태양전지의 경우에 기판크기의 증대에 따라 대면적의 박막제조공정기술이 요구되며 선진국에서는 이에 관한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

우리나라에서도 ULSI, 평판표시기기 등의 제품개발에 큰 비중을 두고 있으나 관련 기반기술의 취약성이 큰 장애요소로 부각되고 있으며 박막제조공정기술에서 더욱 두드러진다. 그러므로 넓은 면적의 박막을 제조할 수 있는 공정기술의 개발은 관련제품의 개발에 필수적이라 할 수 있다.

본 연구는 대면적 박막제조기술 개발에 있어서 가장 중요한

방법인 화학증착방법에 초점을 맞추어 공정기술기반확립에 기여함을 목적으로 한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용과 범위

1. 대면적 박막제조 CVD 공정설계
2. 박막제조 CVD 반응기 전산기본모델개발

Ⅳ. 연구결과 및 활용에 관한 건의

본 연구는 대면적 박막제조를 위한 CVD 반응기공정개발의 1차년도 사업으로서 대면적 박막제조공정과 관계되는 제반사항을 검토하고 공정개발에 필요한 기본설계와 전산기본모델을 만들었다. 대면적 박막제조에서는 박막의 균일도가 가장 큰 문제가 되는데 이를 위해서는 온도분포, 가스농도분포 등의 증착조건의 균일성이 요청된다. 여러가지의 공정변수들이 박막제조에 미치는 영향을 조사하는데에는 전산모사가 유용한 까닭으로 본 연구에서도 잘 알려진 수치해법을 이용하여 화학증착반응기 모사에 범용성이 있는 전산모델을 개발하였다. 개발된 전산모델을 검증, 보완하기 위해서는 적절한 실험데이터와의 비교가 필요한데, 본연구가 계속되어 실험장치가 완성되면 가능할 것이다. 앞으로 지속적인 연구비 지원에 의해서 증착장치가 완성되고 대면적 박막제조실험이 수행되면 우리나라의 박막제조장치제작기술의 발전에 크게 기여할 것으로 사료되며 이를 위한 지속적인 지원이 요망된다.

SUMMARY

I. Title

A Study on the Process Development of Large Area Thin Film Deposition

II. Purpose and Importance

Thin films form frequently key components in many technology-intensive products such as semiconductor chips, optical and magnetic memory devices, solar cells, flat panel displays, various sensors, etc. The key technology here is making thin films with desired shape, size and properties. As the size of substrate increases, the importance of thin film deposition technology also increases. The technological basis of thin film deposition is still very weak in our country and dependence on foreign technology is common for many industrial products.

Intensive research and development efforts are made abroad for thin film deposition of large areas with the increase of substrate size in ULSI, flat panel display, solar cells, etc. The importance of those products is recognized by the domestic industry, but lack of necessary process technology is looming large as the potential road block for the developments of those products in the country.

In this study we will develop a basis for the large area thin film

deposition with CVD method.

III. Contents and Scope

1. Process design of large area thin film deposition CVD reactor system.
2. Development of a basic simulator for CVD reactor.

IV. Results and Recommendations

In this study, as the first year work of three year project, various aspects of deposition technology for large area thin film were investigated. A basic process design for CVD reactor system was completed and a basic simulation was performed. In large area thin film deposition uniformity is of main concern. For uniformity maintaining of uniform temperature and gas concentration is important.

The simulator developed in this study was based on a well known algorithm. To validate the model a well designed and accurate set of experimental data is needed. With continued work a prototype reactor for large area thin film deposition will be completed in the second year of the study. Together with the refined simulator it will contribute significantly to the progress of thin film technology.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	15
Section 1. Thin films	15
Section 2. Large area thin film	18
1. glass coating	18
2. thin film solar cells	19
3. ULSI	25
4. Flat Panel Displays	27
Section 3. Deposition methods of large area thin film	29
Chapter 2. Deposition of large area thin films	31
Section 1. CVD thin film deposition	31
1. Parameters in CVD	31
2. Uniformity	36
3. Profile of temperature	38
4. Profile of gas concentration	40
5. Achievement of uniformity	43
6. New chemistry route	46
Section 2. Reactor analysis and simulation	46
1. Characteristics in simulation of thin film deposition	46
2. CVD models in the literature	53
3. Algorithms	56

Chapter 3. Process design of CVD thin film deposition	62
Section 1. Past experiences	62
1. poly-silicon deposition	62
2. tungsten deposition	67
3. amorphous-silicon deposition	72
Section 2. Process design	75
 Chapter 4. Reactor analysis and simulation	 82
Section 1. Past experiences	82
Section 2. Simulation algorithm	89
Section 3. Results	91
 Chapter 5. Conclusions	 104
 REFERENCES	 105

목 차

제1장 서 론	15
제1절 박막	15
제2절 대면적 박막	18
1. glass coating	18
2. 박막태양전지	19
3. ULSI	25
4. Flat Panel Display	27
제3절 대면적 박막제조방법	29
제2장 대면적 박막제조	31
제1절 CVD 박막제조	31
1. CVD 주요변수	31
2. 균일성	36
3. 온도분포	38
4. 농도분포	40
5. 균일도의 유지	43
6. 새로운 chemistry	46
제2절 반응기해석 및 Simulation	46
1. 박막증착모사의 특성	46
2. 문헌상의 CVD 반응기모사	53

3. 수치해석기법	56
제3절 CVD 반응기	59
제3장 CVD 박막제조장치 설계	62
제1절 과거경험	62
1. poly-silicon	62
2. 텅그스텐증착용 CVD 반응기	67
3. 비정질 실리콘증착용 PECVD 반응기	72
제2절 공정설계	75
제4장 반응기해석 및 모사	82
제1절 과거의 경험	82
제2절 Simulation Algorithm	89
제3절 계산결과	91
제5장 결 론	104
참 고 문 헌	105

LIST OF TABLES

Table 2. 1	Various Chemical Reactions of CVD related with VLSI.	33
Table 2. 2	Material Structure and Scale of Interest.	34
Table 2. 3	Typical Deposition Rate of CVD.	35
Table 2. 4	Radiative Heat Transfer Rate and Conductive Heat Transfer between Wafer and Susceptor.	40
Table 2. 5	Modeling Equations.	48
Table 2. 6	Boundary Conditions.	49
Table 2. 7	Gas Phase and Surface Reaction Mechanism for Growth of GaAs from TMG and Arsine.	51
Table 2. 8	Dimensionless Parameter Groups in CVD.	54
Table 2. 9	Computational Considerations in CVD Modeling.	57
Table 2.10	Development of CVD Reactors for Tungsten Deposition. ...	61
Table 3. 1	List of Equipments.	81
Table 4. 1	Comparison of CVD Model Computation.	84
Table 4. 2	Resources Required for Modeling with FLUENT.	88

LIST OF FIGURES

Figure 1. 1	Structure of Copper Sulfide Thin Film Solar Cell.	20
Figure 1. 2	Manufacturing Process of Copper Sulfide Thin Film Solar Cell.	20
Figure 1. 3	Crosssection of Amorphous Silicon Solar Cell.	22
Figure 1. 4	Fabricating System of Amorphous Silicon Solar Cell. ...	22
Figure 1. 5	Structrre of CIS Solar Cell.	23
Figure 1. 6	Structure of Cadmium Telluride Solar Cell.	24
Figure 1. 7	Progress in Conversion Efficiency of Various Thin Film Solar Cells.	25
Figure 1. 8	A Typical LSI Structure on Silicon Wafer.	26
Figure 1. 9	Sizes of Wafers.	26
Figure 1.10	Crosssection of LCD.	28
Figure 1.11	Crosssection of EL.	29
Figure 2. 1	Relationship among Variables in CVD Process.	32
Figure 2. 2	Deposition Pressure and Temperature of Various CVD Systems.	37
Figure 2. 3	Variation of Gas Concentration in CVD Reactors.	42
Figure 2. 4	Thiele modulus and Concentration Profile.	43
Figure 2. 5	Horizontal Flow Reactor and Adjustment of Gas Flow....	44
Figure 2. 6	Roll-to-Roll CVD Reactor.	45

Figure 2. 7	Fucntion of CVD Mathematical Model.	47
Figure 2. 8	Schematic of Transport and Reaction Process Underlying CVD.	50
Figure 2. 9	Crystal Growth Modes : (a) three-dimensional island (Volmer-Weber) growth, (b) layer-plus-island (Stranski -Kastanov)growth, and (c) layer-by-layer (Franck- van der Merwe)growth.	52
Figure 2.10	Step Coverage in microscale.	53
Figure 2.11	Impinging Jet Type CVD Reactor	55
Figure 2.12	Schematic Diagram of Transport, Chemistry and Geometric Complexity in CVD Reactor Models.	58
Figure 3. 1	Schematic Diagram of CVD Reactor System for Poly- silicon Deposition.	63
Figure 3. 2	Process Sequence Diagram for Poly-silicon Deposition.	65
Figure 3. 3	Temperature Variation around Substrate in Poly-Silicon Deposition.	66
Figure 3. 4	Schematic Diagram of CVD Reactor System for Tungsten Deposition.	68
Figure 3. 5	Process Sequence Diagram for Tungsten Deposition : Hydrogen Reduction of Tugsten Hexafluoride.	69
Figure 3. 6	Process Sequence Diagram for Tungsten Deposition : Silane Reduction of Tungsten Hexafluoride.	70
Figure 3. 7	Profile of Tungsten Film Thickness across Wafer.	71

Figure 3. 8	Schematic Diagram of PECVD Reactor System for Amorphous Silicon Deposition.	73
Figure 3. 9	Process Sequence Diagram for the Deposition of Amorphous Silicon from Silane.	74
Figure 3.10	Components of CVD Reactor System.	76
Figure 3.11	Schematic Diagram of Reactor System.	79
Figure 3.12	Schematic of Reactor.	80
Figure 4. 1	Schematic Diagram of ETRI Single Wafer LPCVD Recator.	83
Figure 4. 2	Typical Calculation Results for ETRI Reactor.	85
Figure 4. 3	Calculation Result for Tungsten CVD Reactor.	87
Figure 4. 4	Control Volume for Two Dimensional SIMLPE algorithm.	90
Figure 4. 5	An Example of Output from Model Calculation.	93
Figure 4. 6	Contours Converted from Model Calculation Results.	102

제1장 서 론

제1절 박 막

박막은 ULSI(Ultra Large Scale Integration)로 대표되는 각종의 반도체소자, optical disc 및 magnetic disc 등의 광/자기 기록매체, LCD(Liquid Crystal Display) 혹은 EL(Electro-Luminescence)과 같은 평판표시기기, 태양전지, 각종 센서 등의 여러 첨단제품의 핵심기능을 맡고 있고, 또 수많은 제품의 표면처리 등에 널리 사용되고 있어서 박막의 제조, 특성평가 등의 박막관련기술은 응용범위가 넓고 산업적으로 매우 중요하여 선진 여러나라에서 활발히 연구되고 있다(한국과학기술연구원보고서, 1991).

박막이 산업적으로 이용되려면 장시간에 걸쳐 제 성능을 발휘할 수 있어야 되는데, 이를 위해서는 원료물질로부터 적절한 방법에 의해 기판 혹은 시료에 원하는 형태, 조성 및 특성을 가진 박막을 제조할 수 있어야 한다. 박막의 특성은 재질, 제조방법, 후처리 그리고 박막이 일부를 이루고 있는 소자 혹은 기기의 작동에 관계되므로 재료, 물리, 전자, 화학 및 공정공학 등이 복합적으로 관계되는 대표적인 inter-disciplinary 기술이다. 따라서 기술 발전도 여러분야의 전문가들의 공헌을 필요로 한다.

박막은 용도에 따라서 요구되는 물성이 정해지며 이에 따라 박막제조 방법도 달라질 수 있다. 그러므로 박막에서는

device \longleftrightarrow material/process \longleftrightarrow equipment

의 관계가 성립된다. 즉 특정의 소자를 만들기 위해서는 소자를 구성하는 박막의 특성이 어느 범위 안에 있어야 하며 그에 따라 적절한 소재가 선택되며 박막제조방법도 고안 혹은 선택된다. 박막 제조장치의 선택 혹은 설계는 그 다음에 이루어진다. 물론 혁신적인 새로운 장비의 개발 혹은 개선, 또는 새로운 소재개발이 소자 설계에 영향을 주므로 위의 관계가 한쪽 방향으로만 국한된 것은 아니다.

한편 국내에서도 반도체 등 관련산업이 발전함에 따라서 박막관련기술의 수요도 급격히 증가하고 있다. 그런데 박막관련연구 현황을 살펴보면 우리나라의 일반산업구조 및 기술수준의 특성이 잘 반영되어 있어서, 거의 모든 핵심 설비와 기술을 외국에서 도입하여 생산에 급급한 실정에 있다. 그러므로 원천기술개발은 등한할 수 밖에 없으며 다만 기기 특성과 관련되는 물리·전자 측면의 연구가 일부 학계에서 수행되어 소자,기기 특성에 초점을 맞춘 연구결과가 일부 발표되고 있다. 소재평가와 관련된 연구도 재료전문가들에 의해서 진행되어 오고 있으며, CVD등 박막제조공정에 관한 기초연구도 일부 시작은 되고 있다.

우리나라에서는, 반도체산업에서 잘 드러나 듯이 설비 및 원자재를 외국에서 도입하여 제품을 생산하여, 생산규모로는 단시간 안에 세계적인 위치를 차지하게 되었으나 기반기술의 취약성은 개선

되지 못하고 있다. 이러한 환경에서는 제품설계 혹은 제품설계기술의 확보에 급급하게 될 수 밖에 없고, 장비 및 공정기술은 자연히 외국에 의존 할 수 밖에 없다. 그리하여 반도체의 집적도가 증대됨에 따라 새로운 장비 및 기술을 지속적으로 외국으로 부터 도입할 수 밖에 없는 것이 현재 우리의 실정이다.

그런데 실험실에서 소자, 혹은 재료기술에 관한 기술개발이 성공하더라도 장비개발로 대표되는 공정기술의 뒷받침이 없으면 개발된 기술을 생산현장으로 이전시키기가 쉽지 않으므로 사상누각으로 끝나기가 쉽다. 기계류의 대일의존도가 높아서 대일무역적자가 개선되기 어려운 데에서 잘 나타나듯이, 생산설비를 제작할 수 있는 기술을 보유하고 있지 않으면서 산업의 고도화를 꾀하는 데에는 어려움이 따를 수 밖에 없다.

대면적 박막

박막제조공정에서는 생산성을 고려하여 개개의 소자는 크지 않지만 여러개의 소자를 일괄처리하는 경우가 많은데, 이러한 경우에도 여러개의 소자를 균일하게 처리할 수 있어야만 한다. 그리고 개개의 소자가 크면 소자 한개에 대해서도 균일성 유지가 관건이 될 수 있다. 작은 면적의 박막제조는 어느 방법으로 하던지 비교적 쉽게 가능하지만 넓은 면적의 박막제조에는 기술적인 어려운 점이 많아 연구개발의 여지가 많으며 산업적으로도 매우 중요한 기술이다.

제품 혹은 제조공정의 특성으로 인하여 넓은 면적의 박막제

조가 요구되는 예로서는 glass coating, solar cell 제조, 평판표시기, ULSI등을 들 수 있다.

제2절 대면적 박막제조

1. Glass Coating

유리기판 위에는 여러가지 물질을 다양한 방법으로 coating 할 수 있으며 architectural glass, mirror, optical filter, artificial jewel 등의 제조를 위해 공업적으로 널리 이용되고 있다(Pulker, 1984). 그 중에서도 특히 architectural glass의 경우는 제곱미터 단위의 상당히 넓은 면적의 기판을 대량으로 처리하게 되는데 on-line load lock 장치를 갖춘 planar magnetron system이 흔히 생산공정에 이용된다.

처리되는 기판의 크기가 커지면 당연히 제조장비도 커지므로 제조장비의 가격도 비싸질 수 밖에 없다. Thelen 과 Wirz(1989)는 evaporation coating machine cost가 substrate diameter의 3승에 비례하며 sputtering의 경우에는 coating machine cost가 substrate diameter 의 자승에 비례한다고 하였다. Glass coating 의 경우 박막이 active device를 형성하지 않는 한 요구되는 물성의 사양이 비교적 엄격하지 않으므로 공정비의 저렴화가 주요 변수이며, 따라서 비교적 값비싼 박막제조방법은 적용하기가 어렵다.

2. 박막태양전지

에너지원이 무진장이며 공해가 없는 clean energy라는 측면에서 태양전지는 이상적이지만 본격적인 power generation을 위한 실용화를 위해서는 가격의 저렴화가 관건이다. 기존의 화력발전 혹은 원자력발전과 가격경쟁력을 가지기 위해서는 현재의 \$0.7/kwh 태양전지 전력단가를 약 10분의 1 정도로 낮출 수 있어야 한다고 한다(Zweibel, 1990). Power generation 용으로는 결정질실리콘태양전지가 일반적으로 사용되어 왔으나 원재료(CZ silicon)가 비싸고 대량생산공정의 단순화가 쉽지 않은 관계로 대폭적인 가격저렴화에는 한계가 있다.

반면에 박막형태의 태양전지는 재료가 적게 소요되고 박막제조공정에 의한 공정의 연속화가 가능한 관계로 가격저렴화가 비교적 용이하다. 박막태양전지는 구성재료에 따라 아래의 여러가지 종류가 있으며 사용되는 박막제조방법도 재료에 따라 다르다.

Copper Sulfide 태양전지

최초의 copper sulfide 태양전지는 1950년대에 cadmium sulfide (CdS)에 electroplating으로 copper를 입혔을 때 PV(Photo-Voltaic) 성능을 나타내는 것이 관찰됨으로서 우연히 만들어지게 되었다. 이 CdS/Cu₂S heterojunction 구조(그림1.1)를 가진 태양전지는 제조방법이 단순하여 제조원가가 매우 저렴하다는 매력을 지니고 있다. 그림 1.2 에서 보듯이 유리기판 위에 투명전도막(SnO₂)과 CdS층을 spray 로 입히고 Cu₂S 층은 chemical dip coating 방법으로 입힌다.

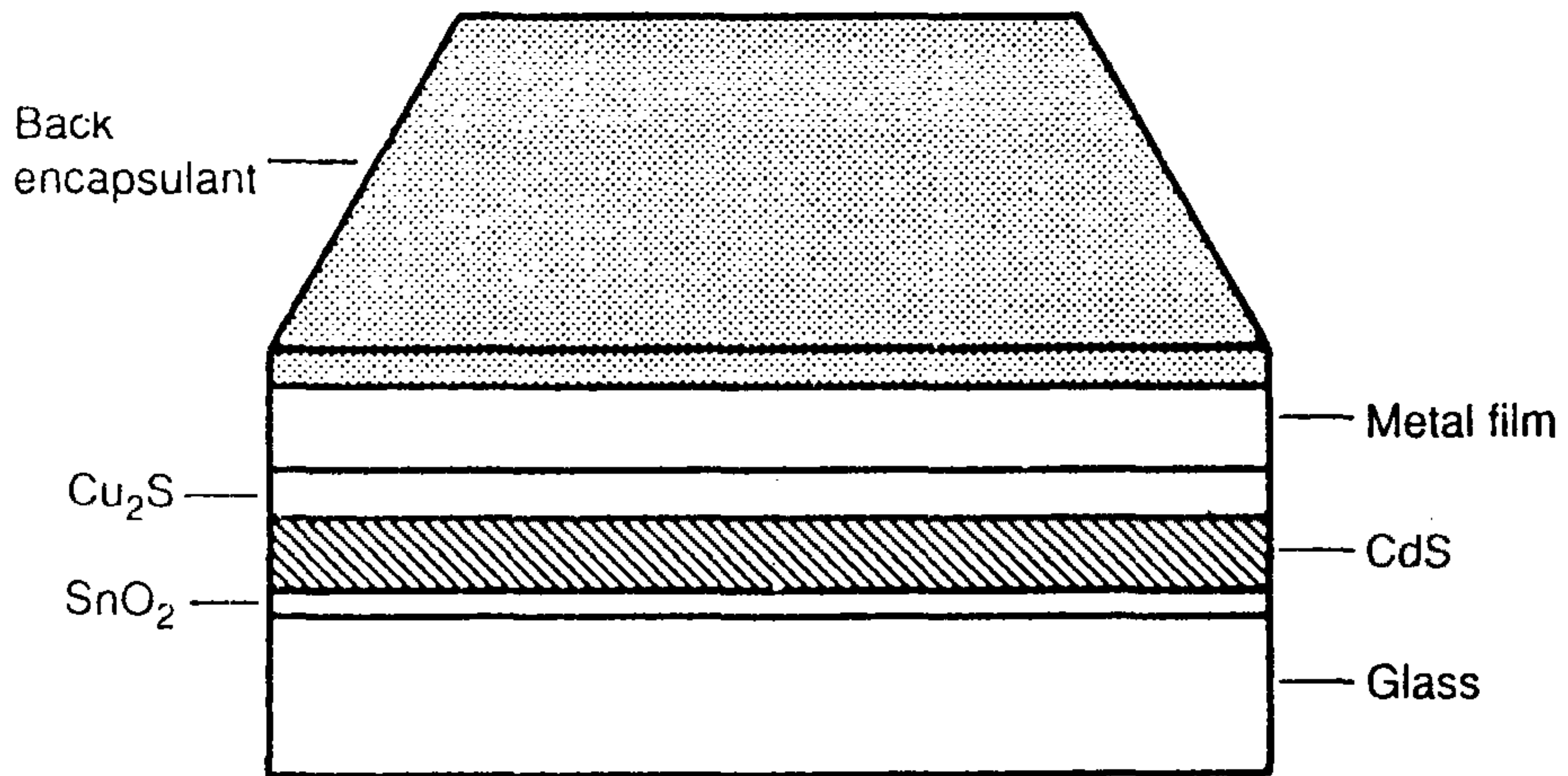


Figure 1. 1 Structure of Copper Sulfide Thin Film Solar Cell.

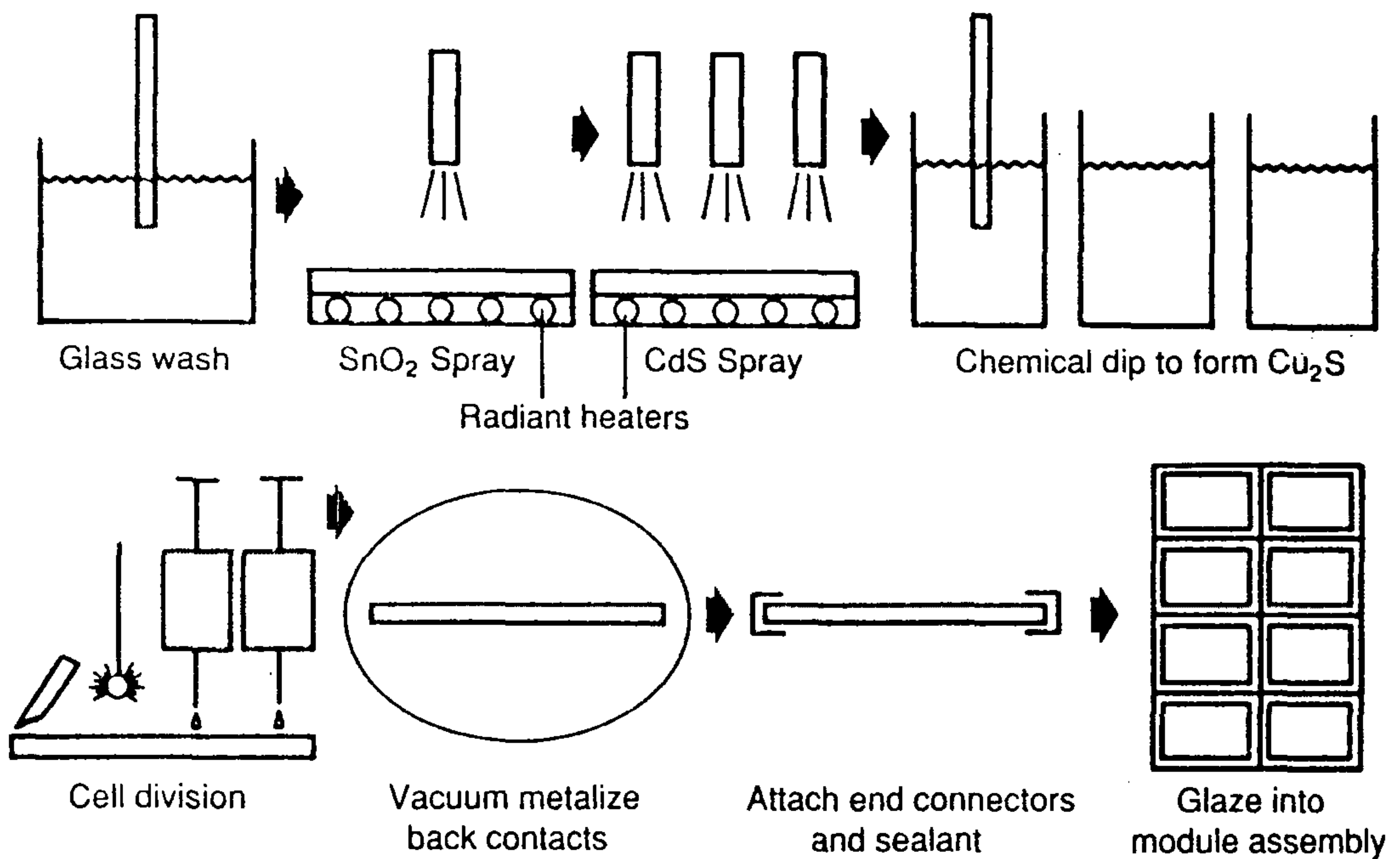


Figure 1. 2 Manufacturing Process of Copper Sulfide Thin Film Solar Cell.

이러한 박막제조공정은 진공장치를 사용하지 않는 관계로 공정비용이 저렴하다. 그러나 Copper Sulfide 태양전지는 전환 효율이 낮고 제조된 태양전지의 안전성에 문제가 있어서, 현재에는 큰 관심의 대상이 되지는 않고 있으나 대규모 생산공정설비개발까지 이루어졌으므로 그 후 다른 종류의 박막태양전지 개발에 많은 도움을 주었다.

비정질실리콘태양전지

현재까지는 실리콘웨이퍼(single-crystal silicon)를 사용하는 태양전지가 본격적인 태양전지의 대중을 이루어왔는데 대량보급에서의 필요조건이 되는 대폭적인 가격저렴화가 더 이상 쉽게 이루어질 전망이 뚜렷하지 않게되자, 1980년대에는 미국, 일본, 독일 등지에서 비정질실리콘(amorphous silicon)계 태양전지에 관한 연구개발이 집중적으로 수행되게 되었다. 비정질태양전지는 p-type dopant(B_2H_6)가 첨가된 p층, dopant가 첨가되지 않은 i층 (intrinsic layer), 그리고 n-type dopant(PH_3)가 첨가된 n층의 p-i-n cell 구조를 기본으로 하고 있다(그림 1.3). 제조방법은 일반적으로 glow-discharge를 사용하여 PECVD이며 대량생산공정은 그림1.4에서 보듯이 기판이 연속적으로 vacuum chamber를 통과하는 양식이다.

미국의 ARCO Solar에서 전환효율이 9.4%이고 면적이 1 평방피트인 solar cell module 을 개발했으며 미국의 Chronar에서는 면적이 10 평방피트인 module을 개발했다. 그러나 손목시계, 계산기 등의 소비자제품용으로는 일본제가 전세계시장을 석권하고 있다. 그

러나 비정질실리콘태양전지도 전환효율이 낮고, 안정성이 만족스럽지 않는 등의 문제를 지니고 있다.

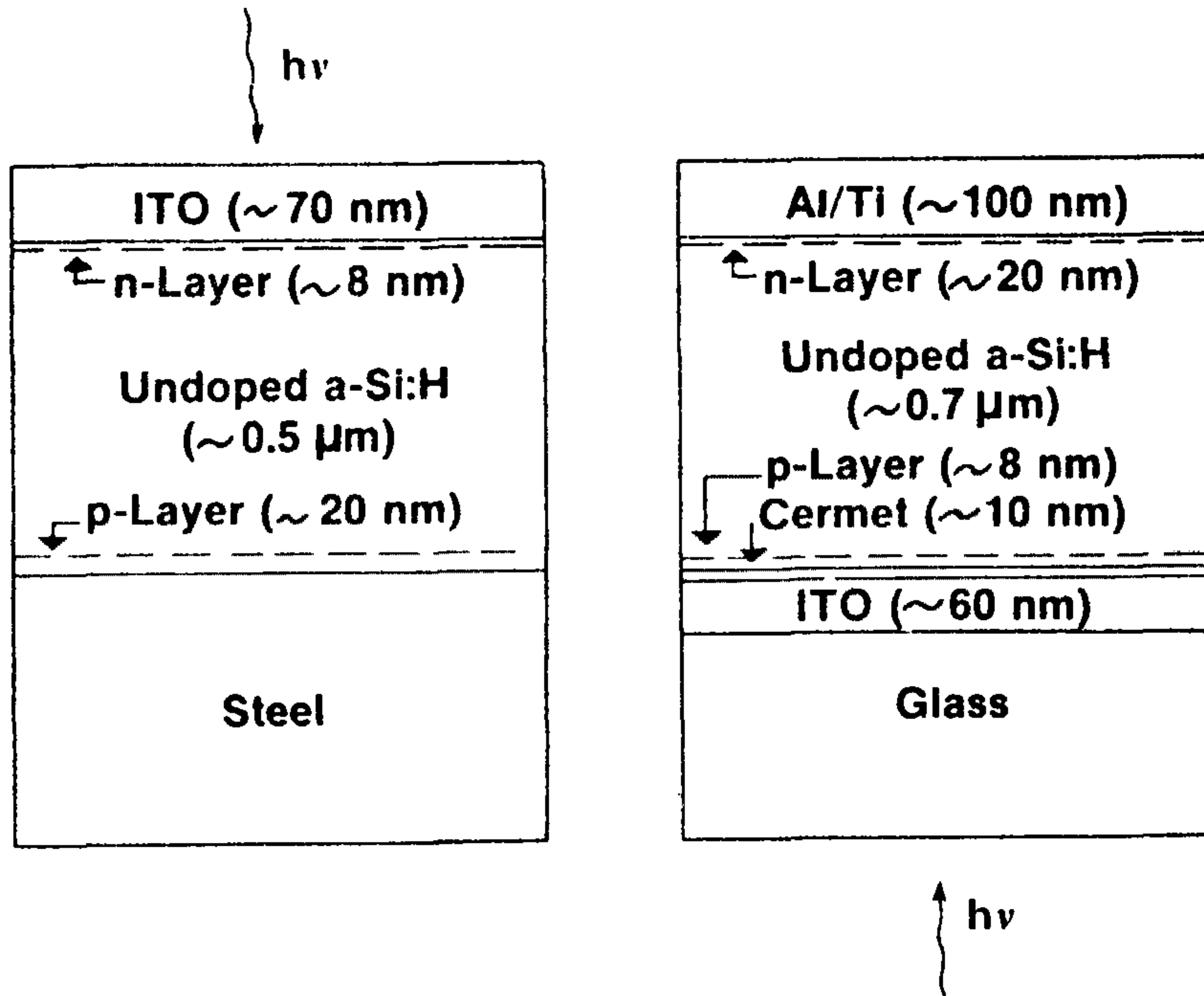


Figure 1. 3 Crosssection of Amorphous Silicon Solar Cell.

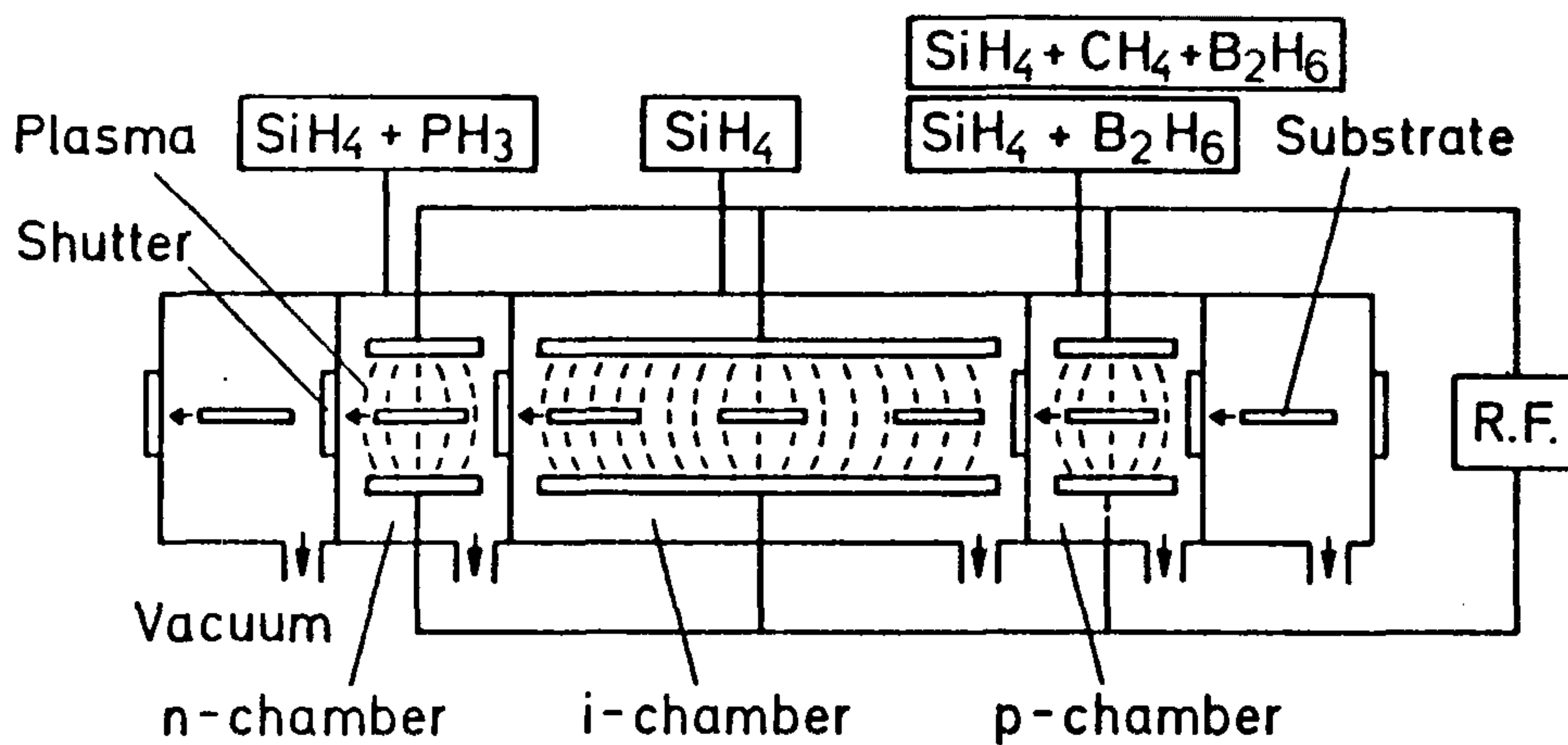


Figure 1. 4 Fabricating System of Amorphous Silicon Solar Cell.

CIS(Copper Indium diSelenide)

1970년대에 미국에서 개발되기 시작한 CIS태양전지는 1980년대에 들어와서 비약적인 발전을 이룩하였다. 대표적인 CIS 박막태양전지의 구조는 그림1.5에 나타나 있다. ZnO로 되어있는 TCO (Transparent Conducting Oxide)와 CIS층을 sputtering 으로 제조하고 있으나 보다 저렴한 방법인 spraying 법으로 대체하려는 연구도 진행되고 있다.

면적이 1평방피트인 module은 11.1%, 10평방피트인 module은 9.7%의 전환 효율을 이미 달성한 것으로 보고되고 있다. CIS 태양전지가 대규모로 보급될 경우에는 현재 전세계 생산량이 연간 100톤에 불과한 인듐의 공급이 문제가 될 수 있다.

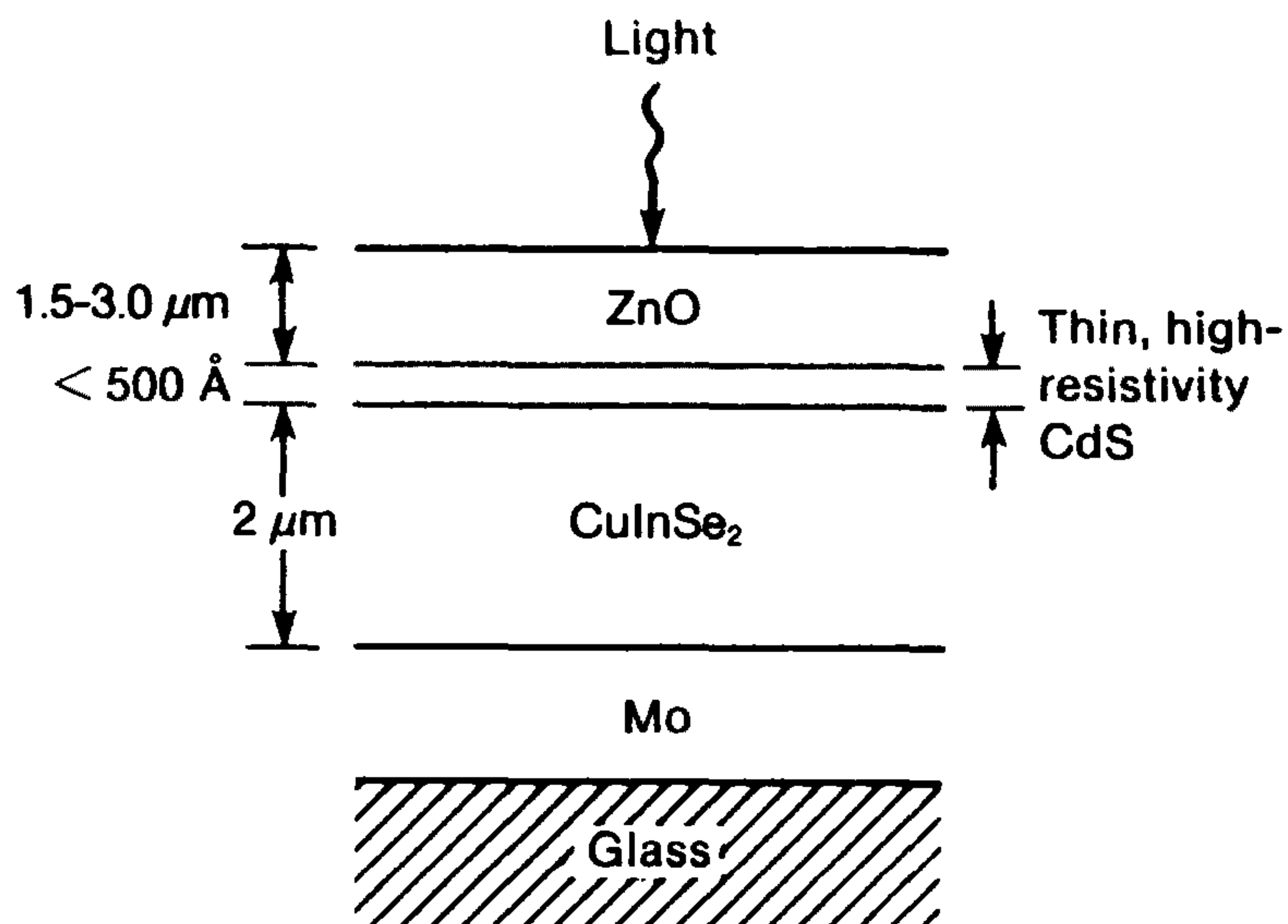


Figure 1. 5 Structure of CIS Solar Cell.

Cadmium Telluride

다른 종류의 박막태양전지에 비해 비교적 개발이 뒤져 있으나 장기적으로 가격저렴화의 잠재력이 크다는 것이 Cadmium Telluride 의 강점이다. 이 태양전지의 구조는 그림1.6과 같으며 가격저렴화가 가능할 수 있는 이유는 CdTe layer를 공정비용이 저렴한 electrodeposition 혹은 spraying 으로 제조가능하다는데 있다.

전환효율은 단위 cell의 경우 12%,module의 경우 7.3%를 달성하였는데, 인체에 끼치는 독성으로 인하여 일반대중에게 인식이 좋지않은 cadmium을 사용한다는 문제점을 안고 있다.

한편 각 박막태양전지모듈의 효율 개선은 그림 1.7에 나타나 있는데 아직은 미국 DOE목표치 15%에는 미치지 못하고 있다. 효율이 높은 대면적 박막태양전지를 염가로 제조에서 대면적 박막제조기술의 개발이 중요한 것은 더 말할 나위가 없다.

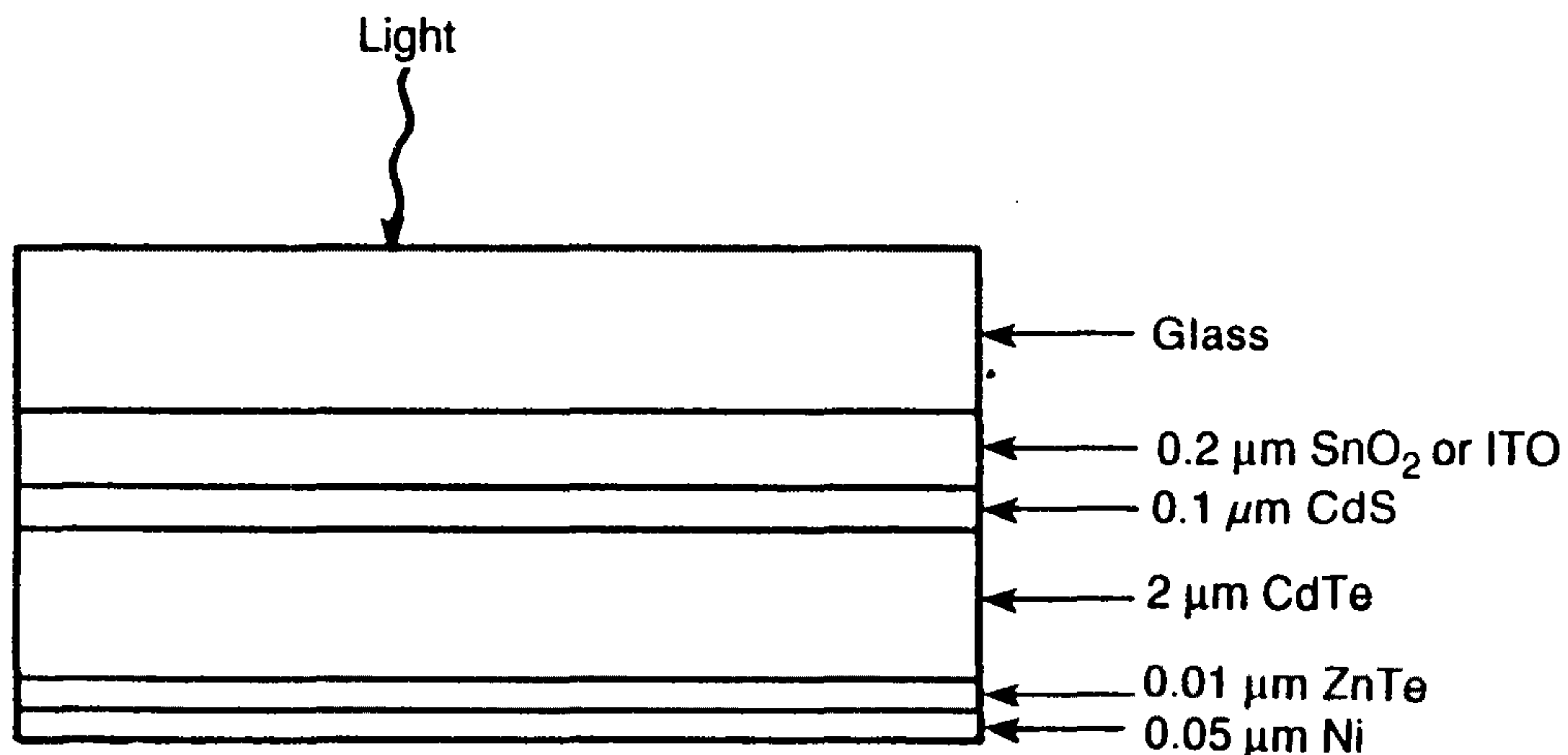


Figure 1. 6 Structure of Cadmium Telluride Solar Cell.

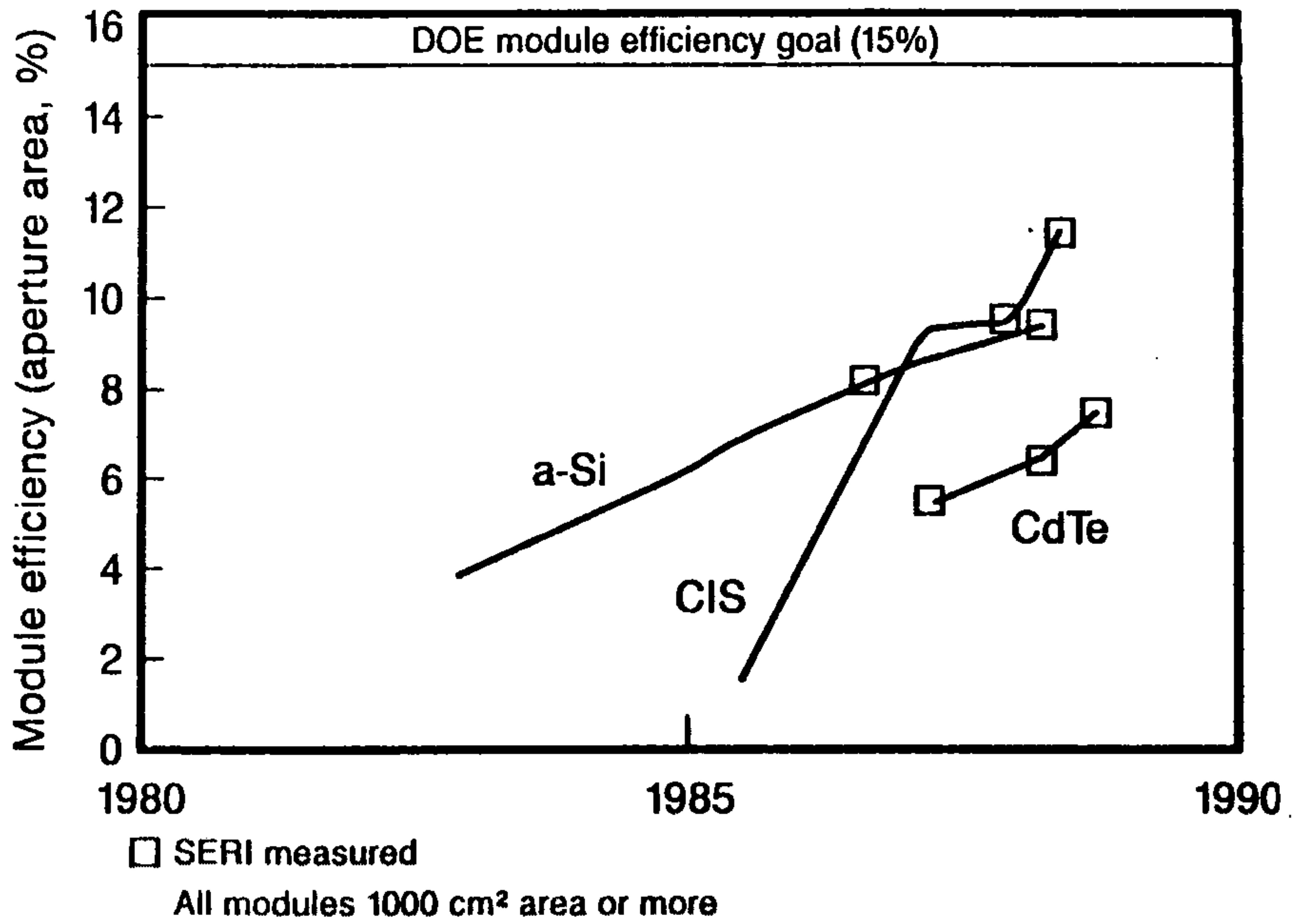


Figure 1. 7 Progress in Conversion Efficiency of Various Thin Film Solar Cells.

3. 반도체

ULSI제조공정에서 박막성형은 그 핵심을 이루고 있으며 CVD 혹은 sputtering에 의해 poly-silicon, silicon dioxide, PSG, BPSG, SiN, W, WSix, Al 등등의 박막이 다양한 반응기 및 공정조건에 의해 silicon wafer 위에 입혀진다(Murarka and Peckerar, 1989). 그림1. 8에는 반도체소자의 단면의 예가 도시되어 있다. 생산성 향상을 위해 사용되는 wafer의 직경도 점점 커져서 8인치 시대에 접어들어가고 있다(그림1.9). 이에 따라 intra-wafer uniformity의 유지가 더욱 중요해 지고 있으며, 이를 위한 박막제조방법의 개발도 자연스럽게 요청되고 있다.

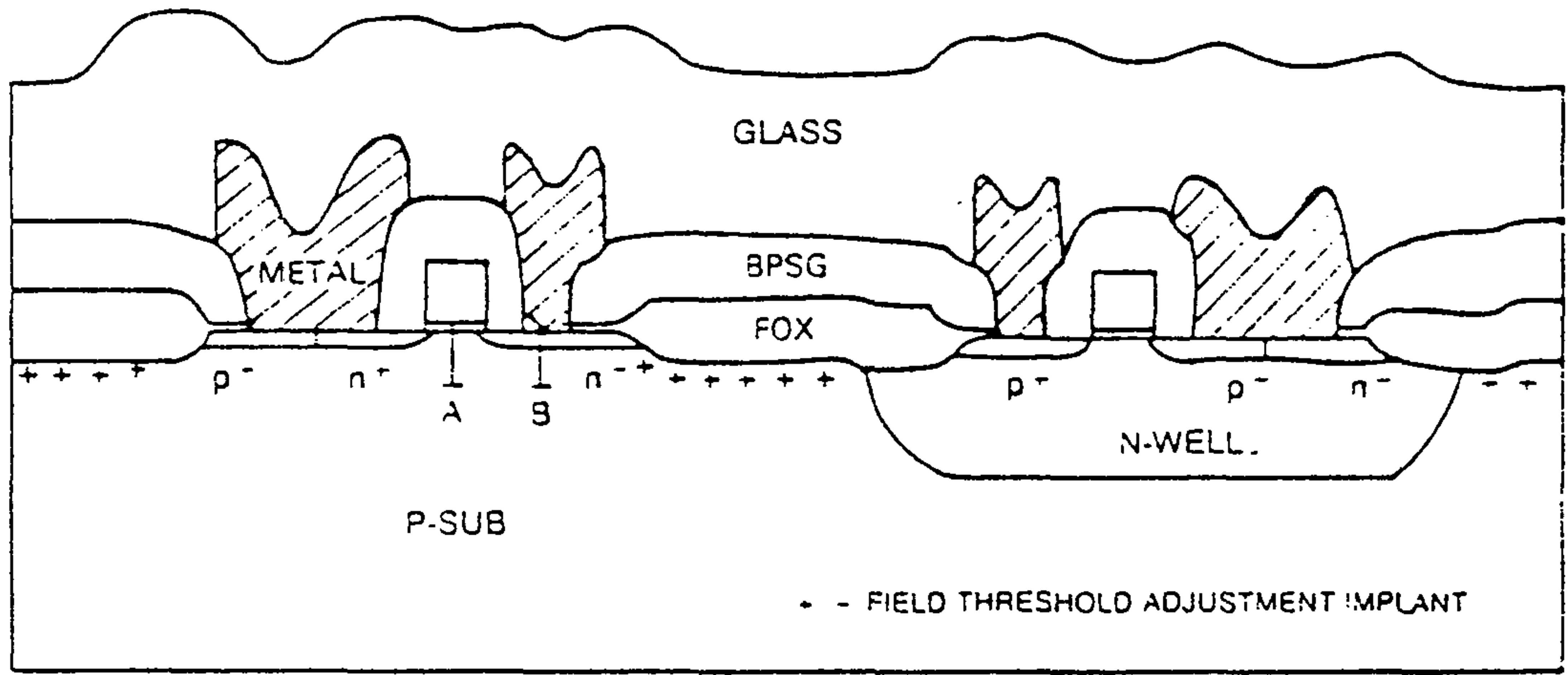


Figure 1. 8 A Typical LSI Structure on Silicon Wafer.

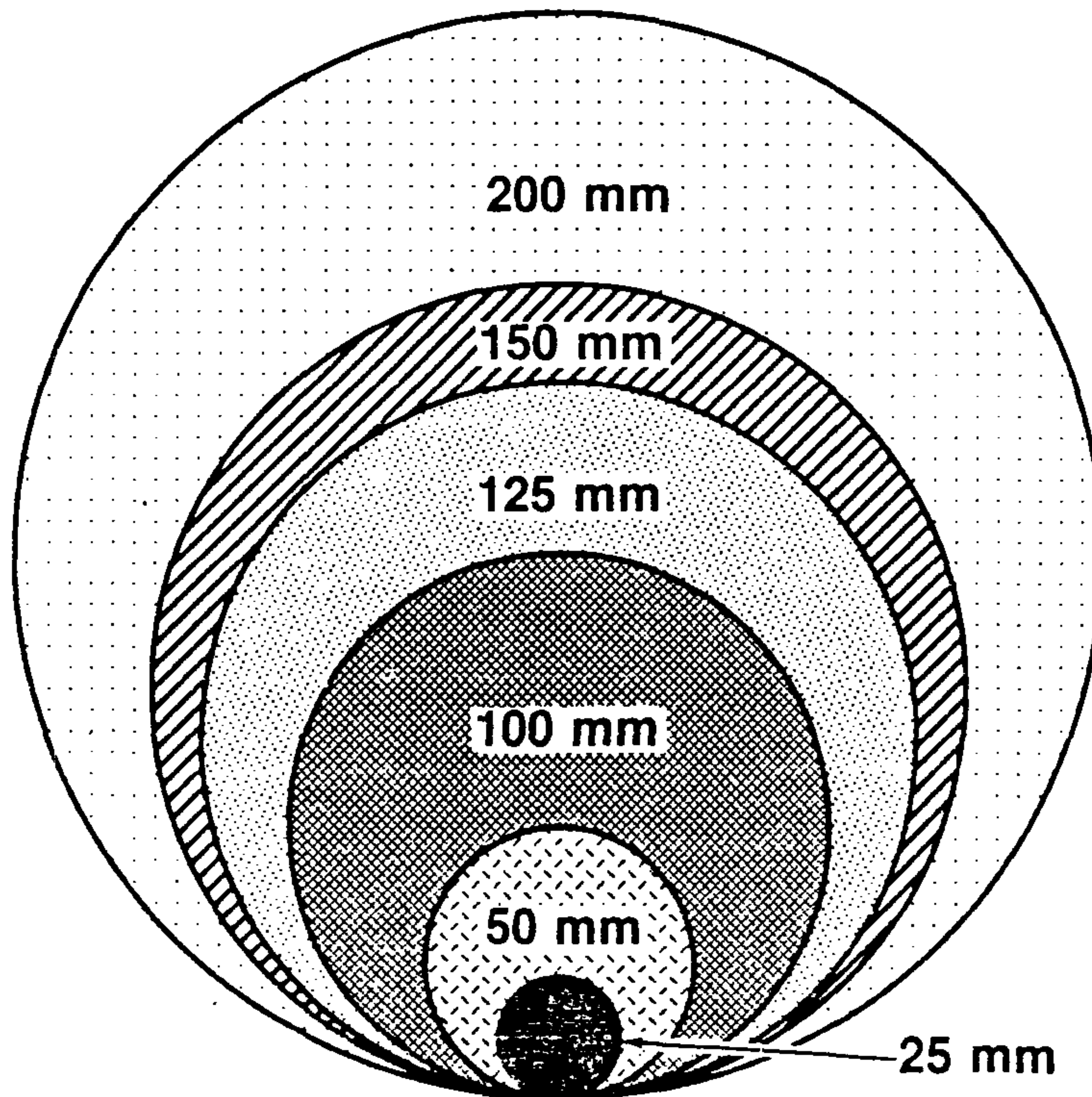


Figure 1. 9 Sizes of Wafers.

4. Flat Panel Display

기존의 CRT보다 더 편리한 flat panel display는 앞으로 현재의 VLSI규모의 시장을 형성할 것으로 전망되고 있다. LCD가 주종을 이룰 것으로 전망되고 있으며(O'Mara, 1991) PDP, EL 등도 기술개발의 혁신이 있게 되면 이들의 역할도 비약적으로 증대될 것이다. Computer display용으로는 10인치에서 20인치, HDTV 용으로는 더 큰 화면이 요구된다.

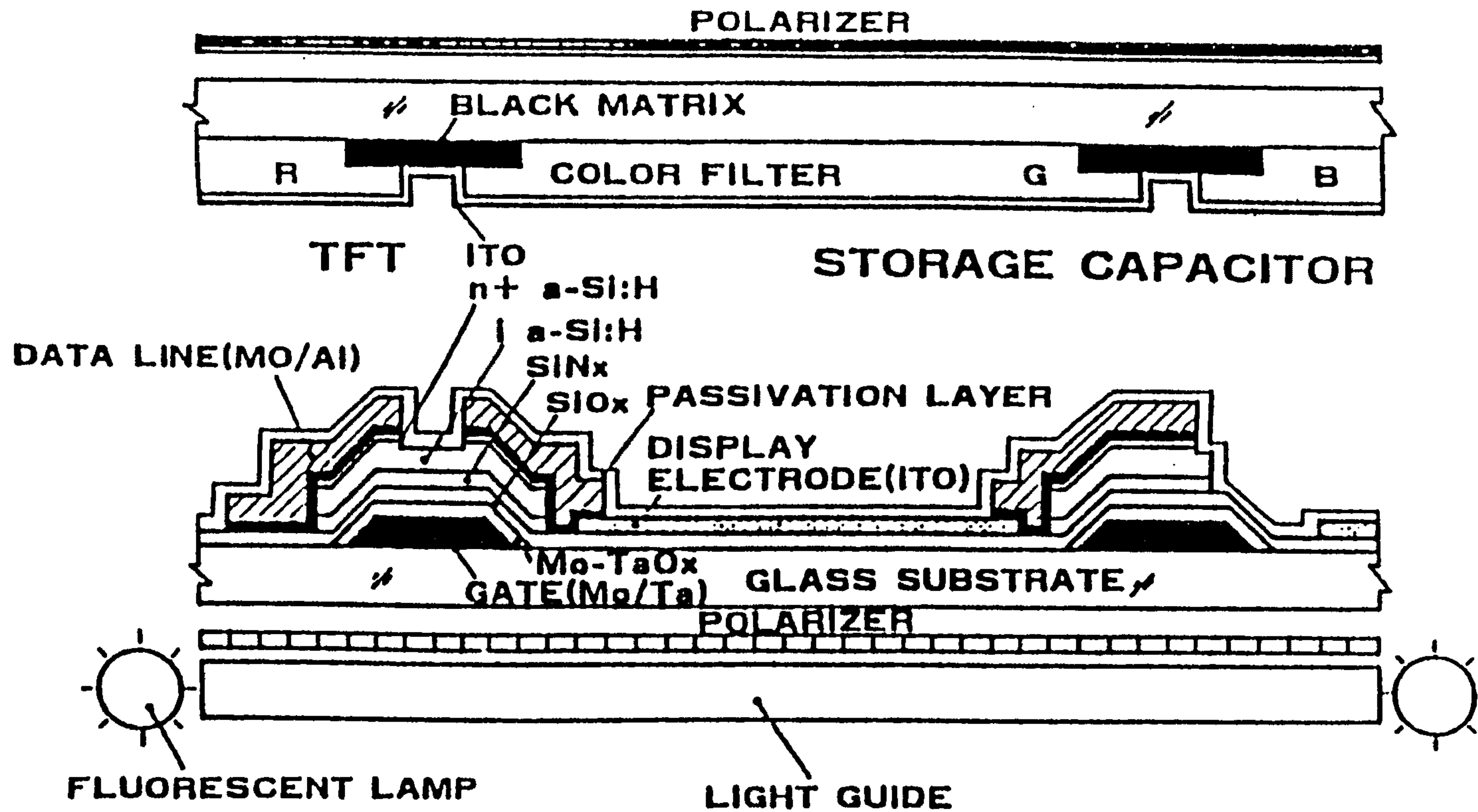
LCD

LCD중에서 현재 많은 연구개발이 진행되고 있는 TFT LCD의 경우 metal electrode와 ITO는 sputtering, amorphous silicon/silicon nitride layer는 plasma CVD 로 제작하는 것이 일반적이다.

특히 HDTV용의 경우에는 panel이 커야 하는데 defect없이 원하는 물성을 가진 박막을 균일하게 경제적으로 증착하는 것은 기술적으로 대단히 어려운 과제이다. AMLCD(Active Matrix LCD)의 경우에 넓은 면적에 100만개 정도의 thin film transistor를 결함 없이 제조하여야 되는데 현재의 기술로는 수율이 낮다는 문제가 있다. 그림1.10에는 LCD의 단면이 도시되어 있다(Holbrook and McKibben, 1991).

EL

현재에는 LCD보다 시장규모가 월등히 작지만 나름대로의 장점과 용도가 있어서 활발히 연구되고 있다. 그림1.11에는 EL의 단면구조가 나타나 있는데 (Tannas, 1985)주로 sputtering 혹은



28

Figure 1.10 Crosssection of LCD.

evaporation과 같은 PVD방법이 EL제조에 이용되고 있으나 ALE (Atomic Layer Epitaxy)도 사용되고 있다. 대면적화에 따르는 어려움을 극복하기 위하여 CVD 혹은 다른 박막제조방법에 관한 연구가 필요하다.

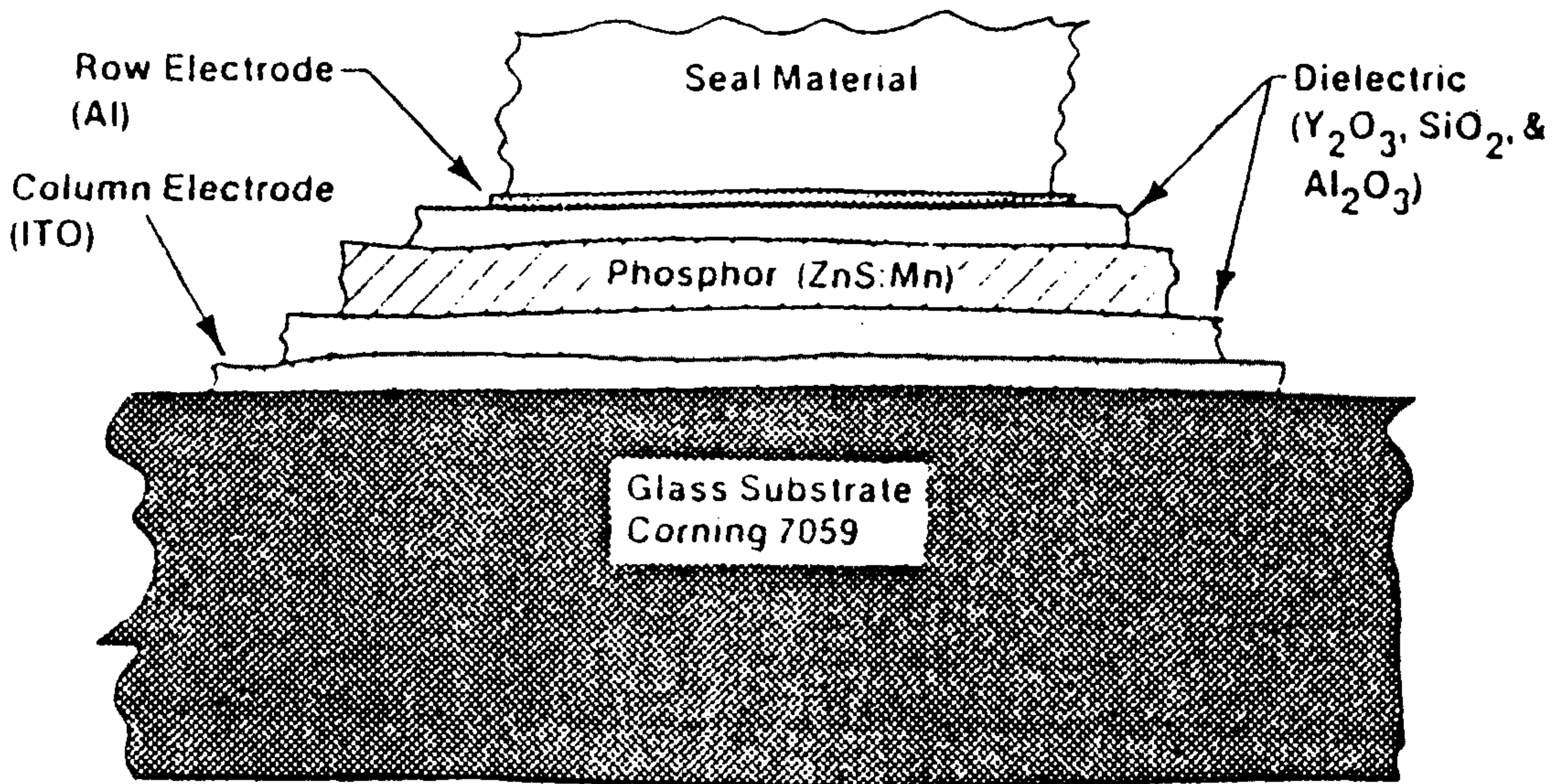


Figure 1.11 Crosssection of EL.

제3절 대면적박막제조방법

박막제조방법에는 많은 종류가 있는데(Vossen and Kern, 1991), 앞에서 살펴 본 바와 같이 대면적 용으로는 Sputtering, CVD, Spraying, Electrodeposition 등이 있다. 이중에서도 용도가 다

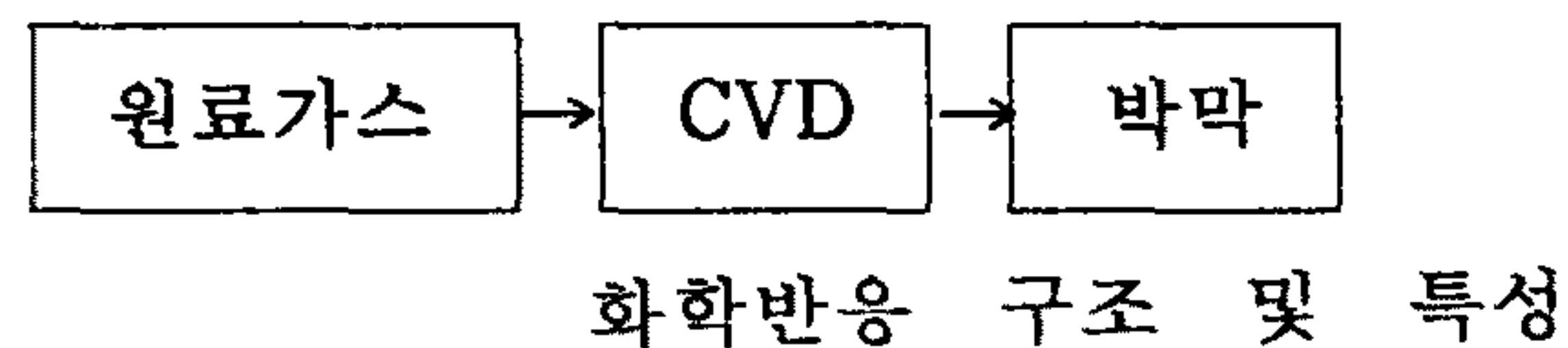
양하며, 화학반응이 수반되는 공정기술이 주요 핵심을 이루며, device 의 발전에 한계를 갖지 않고, 또 기술개발의 여지가 많은 CVD 방법의 대면적 박막제조기술에 본 연구의 초점을 맞추었다.

제 2 장 CVD에 의한 대면적 박막제조

제 1 절 CVD 박막제조

1. CVD의 주요변수

가스를 원료로서 사용하여 화학반응을 통해서 박막을 제조하는 CVD는 원료가 고순도로 정제하기가 용이한 가스이며, 박막제조에 이용할 수 있는 가스 및 화학반응이 다양하며 반응조건을 적절히 조절하면 같은 원료로부터 물성이 다양한 박막을 얻을 수 있다는 등의 특징을 가지고 있다.



CVD공학에서 Komiyama(1990)는 다음 사항들을 중요시하고 있다 (그림2.1).

- 물질 (substance)
- 형태(form)
- 속도 (rate)
- 생성조건(condition)

물질

실로 여러가지의 다양한 물질이 CVD에 의해서 박막으로 제

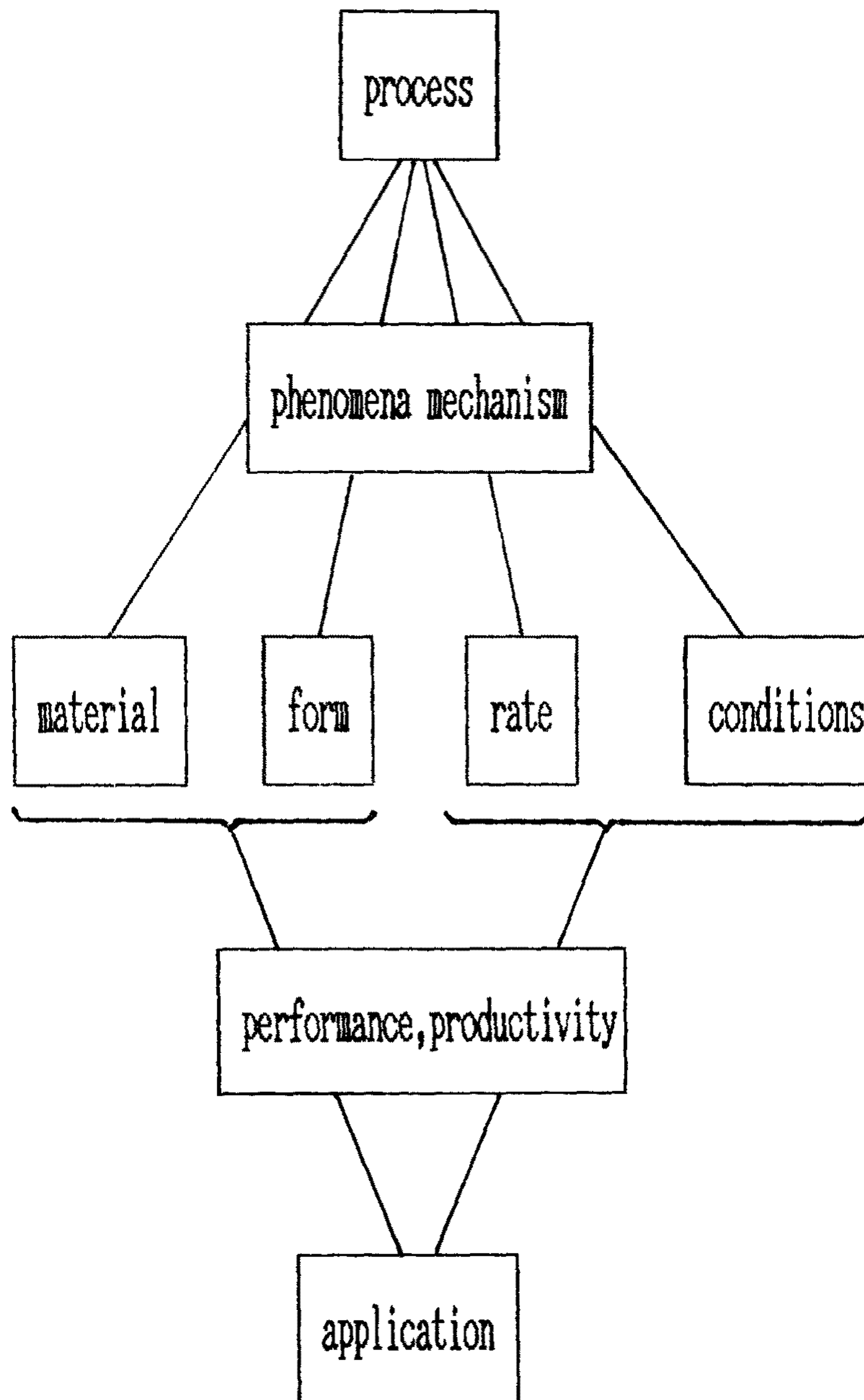


Figure 2. 1 Relationship among Variables in CVD Process

Table 2. 1 Various Chemical Reactions of CVD related with VLSI.

Process	Chemical reaction	remcrk	
C V D	epi Si	· $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 \xrightarrow{\sim 1080^\circ\text{C}} \text{Si} + \text{HCl}$	thermal AP LP (低auto doping)
		· $\text{SiH}_4 \xrightarrow{\sim 1050^\circ\text{C}} \text{Si} + \text{H}_2$	
		· $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2 \xrightarrow{\sim 1200^\circ\text{C}} \text{Si} + \text{HCl}$	
		· $\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \xrightarrow{\sim 1150^\circ\text{C}} \text{Si} + \text{HCl}$	
	poly Si	· $\text{SiH}_4 \xrightarrow[\sim 0.5 \text{ Torr}]{\sim 600^\circ\text{C}} \text{Si} + \text{H}_2$	thermal
	Si_3N_4	· $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{NH}_3 \xrightarrow[\sim 0.5 \text{ Torr}]{\sim 750^\circ\text{C}} \text{Si}_3\text{N}_4 + \text{HCl} + \text{H}_2$	thermal
	SiO_2	· $\text{SiH}_4 + n\text{PH}_3 + \text{O}_2 \xrightarrow[760 \text{ Torr}]{\sim 400^\circ\text{C}} \text{SiO}_2 \cdot \frac{n}{2} \text{P}_2\text{O}_5 + \text{H}_2(\text{H}_2\text{O})$ (+ m B_2H_6) $\left(+ \frac{m}{2} \text{B}_2\text{O}_5 \right)$	thermal PSG, BPSG
		· $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 \xrightarrow[1 \text{ Torr}]{\sim 750^\circ\text{C}} \text{SiO}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	
	PSG BPSG	· $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 + \text{O}_3 \xrightarrow[760 \text{ Torr}]{\sim 350^\circ\text{C}, \sim 10 \text{ Torr}} \text{SiO}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	
	p-SiN	· $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3 \xrightarrow[0.5 \text{ Torr}]{\sim 300^\circ\text{C}} \text{p-SiN} + \text{H}_2$	PECVD
· $\text{SiH}_4 + \text{N}_2 \xrightarrow[0.5 \text{ Torr}]{\sim 300^\circ\text{C}} \text{p-SiN} + \text{H}_2$			
p-SiO	· $\text{SiH}_4 + \text{N}_2\text{O} \xrightarrow[1 \text{ Torr}]{\sim 350^\circ\text{C}} \text{p-SiO} + \text{N}_2 + \text{H}_2(\text{H}_2\text{O})$	PECVD	
	· $\text{SiH}_4 + \text{CO}_2 \xrightarrow[1 \text{ Torr}]{\sim 350^\circ\text{C}} \text{p-SiO} + \text{CO} + \text{H}_2(\text{H}_2\text{O})$		
	· $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 \xrightarrow[10 \text{ Torr}]{350^\circ\text{C}} \text{SiO}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$		
W	· $\text{WF}_6 (+ \text{SiH}_4) \xrightarrow[0.1 \text{ Torr}]{\sim 300^\circ\text{C}} \text{W}(\text{selective CVD})$		
WSi ₂	· $\text{WF}_6 + \text{SiH}_4 \xrightarrow[0.2 \text{ Torr}]{\sim 360^\circ\text{C}} \text{WSi}_2 + \text{SiF}_4 + \text{H}_2$		
	· $\text{WF}_6 + \text{Si}_2\text{H}_2\text{Cl}_2 \xrightarrow[0.2 \text{ Torr}]{\sim 650^\circ\text{C}} \text{WSi}_2 + \text{SiF}_4 + \text{HCl} + \text{H}_2$		

조될 수 있다. 한예로서 표 2.1에는 CVD방법으로 제조되는 VLSI 관련 박막들의 제조에 관련된 반응들이 수록되어 있다.

형태

CVD에 의해서 박막 뿐만 아니라 powder, whisker 등도 생성되며 이들의 생산을 목적으로 CVD가 이용되기도 한다. 박막의 경우도 amorphous, poly-crystal, single crystal 등의 여러가지 형태의 물질생성이 가능하며, 박막의 결정형태가 박막의 물성에 큰 영향을 끼치므로 박막의 용도에 적합한 결정형태로 박막을 제조할 수 있어야 한다. 그리고 VLSI의 경우에 viahole 혹은 trench filling에서는 micron 또는 submicron scale의 step coverage가 중요하여 정교한 형태제어가 필요하다. 표 2.2에는 여러가지 경우에서 형태와 그와 연관되는 scale의 수치가 정리 되어 있다.

Table 2.2 Material Structure and Scale of Interest

(nm)	
0.1	화학결합상태(종류, 결합길이, 배위수등)
1	조성(화학양론식, 불순물, dopant 농도등)
10	결정구조(amorphous, 평형상, 비평형상, 단결정, 다결정:결합, 전이 등)
10 ²	
(μ m)	grain size, 배향성, 이방성
1	막두께분포(stepcoverage등을 포함함)
10	조성분포

다층물질 : 형태(초격자, 초미립자, 초미립자분산 matrix등 형태 및 크기)
계면(부정합, 응력, 조성, 화학결합 등)

증착속도

CVD에 의한 박막 제조속도는 반응계 및 반응조건에 따라서 물론 달라지지만 일반적으로 대표적인 PVD인 sputtering의 시간당 1미크론 보다 높은, 시간당 10미크론 정도이다(표 2.3). 증착속도는 생산성과 직결되어 박막제조 원가에 반영되므로 증착속도의 향상은 실제 공정에서 중요하며 증착속도가 너무 낮으면 MBE의 예에서 보듯이 특수 용도로만 그 사용이 제한될 수 밖에 없다. 그러나 높은 증착속도에서는 균일도의 유지가 상대적으로 어려워진다.

Table 2.3 Typical Deposition Rate of CVD

Method	Deposition rate($\mu\text{m}/\text{h}$)
MBE MOMBE(superlattice)	0.01
MBE MOMBE CVD	0.1
Sputterig	1
CVD	10
Si-epitaxial growth High speed CVD	100
PPCVD	1000

생선조건

화학반응에서 가장 중요한 압력과 온도가 VLSI에 관계되는

CVD 박막물질을 중심으로 그림 2.2에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 압력은 대기압에서 부터 0.1 torr 범위로 sputtering의 경우(0.01-0.001 torr)보다 높아서 성장속도 또한 빠르지만, 그래도 진공펌프를 사용해야하는 subatmospheric 혹은 low pressure CVD가 많이 이용된다. 한편 반응온도는 PVD의 경우에는 훨씬 높아서 300-1200°C의 범위에 있다. 따라서 기판의 가열 및 반응기 내부의 온도제어가 문제가 될수 있다.

2. 균일성

넓은 면적은 박막 제조에서는 박막두께와 물성(material properties)의 균일성(uniformity)이 관건이 되는데 이를 위해서는 가스 농도와 기판온도의 균일성이 요구된다. 그러나 일반적으로 얻을 수 있는 균일도와 증착속도(deposition rate)는 상충되기 쉽다. 가스농도의 균일도 향상을 위해 가스 공급 부위를 shower head 형태로 하는 것이 일반화되어 있다.

기판온도분포구배가 증착속도(혹은 두께)의 균일도에 미치는 영향을 silane의 열분해를 예로서 살펴보자. 이 열분해반응은 activation energy가 약 200KJ/mol이므로 증착반응 기준온도가 섭씨 700도 일 경우, 온도가 섭씨 1도 차이 날때 증착속도는 2.6%정도 차이나게 된다. 그러므로 균일한 증착을 위해서는 엄격한 온도제어가 필요하다는 것을 알수 있다.

한편 PECVD의 경우 plasma의 비균일성이 박막생성의 균일성에 직접 영향을 미칠 수 있다. 13.56MHz power source의 경우 파장이

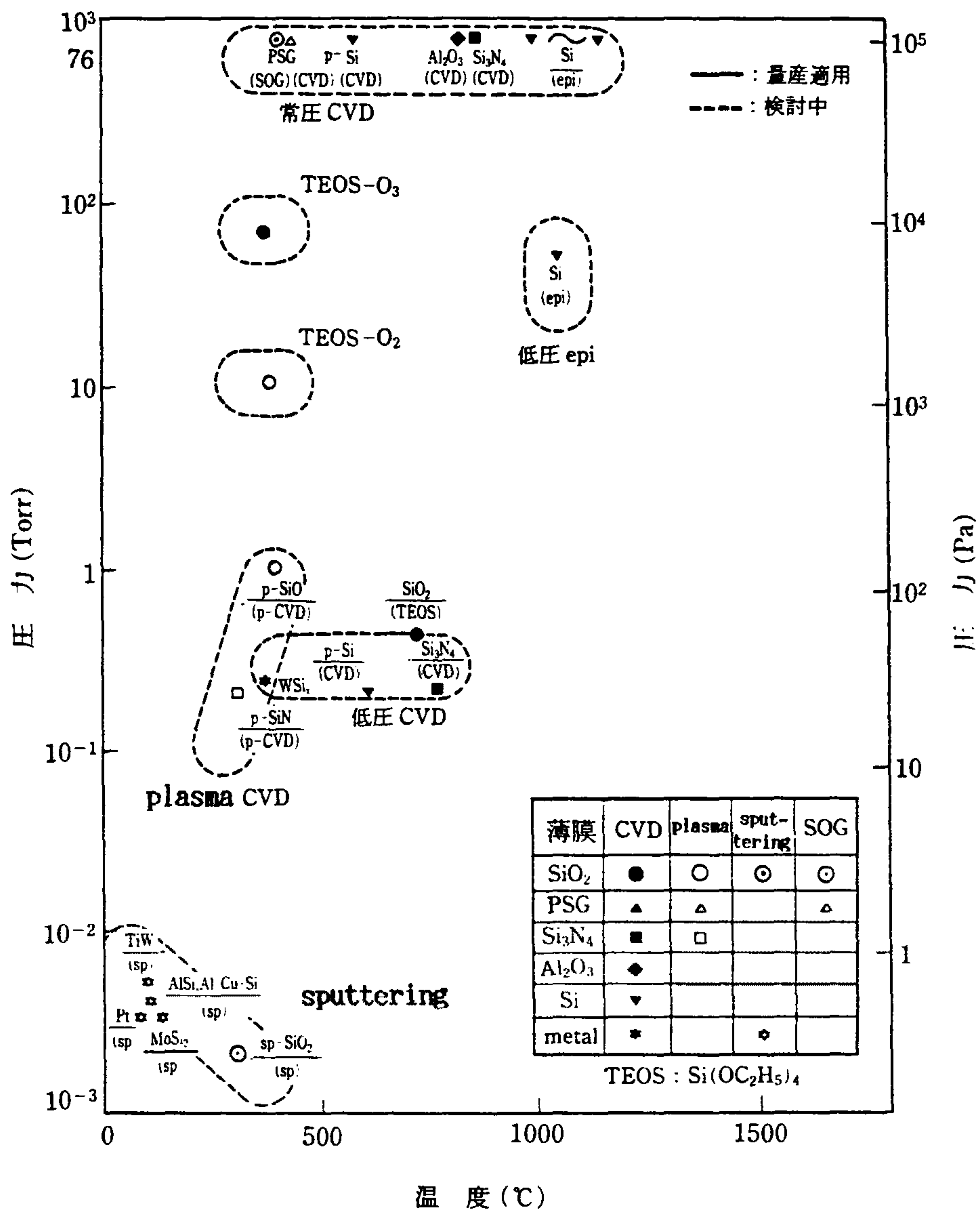


Figure 2. 2 Deposition Pressure and Temperature of Various CVD Systems.

22 meter 정도이므로 기판크기가 1 meter 정도가 되면 RF voltage distribution의 불균일도가 문제 될 수 있다. 이러한 문제는 파장이 짧으면 더욱 심각해질 수 있다(Schmitt, 1991).

3. 온도분포

Hot-wall 형태의 반응기인 경우에는 반응기 내부의 온도를 균일하게 유지하는 것이 비교적 용이하다. 반면에 heat-up/cool-down time이 길어지고, 반응기 벽면에도 박막이 증착되는 등의 불리한 점도 있다.

Cold-wall 반응기의 경우는 반응기 내부의 가스온도는 구배를 가지게 되는데 deposition이 일어나는 표면에서는 온도분포가 중요하다. 그리고 가열방법에 따라서도 영향을 받게된다. Sparks 등 (1987)은 Epitaxial Reactor에서 Radiant Heating과 Induction Heating 방법을 비교하였는데 박막의 물성이 특히 중요하고 제조공정의 온도가 높은 관계로 여러 변수의 영향을 종합적으로 검토하는 것이 중요함을 지적하였다.

한편, 증착이 일어나는 기판표면의 실제온도를 측정하는 일도 그리 단순하지는 않다. 온도 측정에 널리 사용되는 thermocouple을 wafer의 표면에 접촉시켜 사용하는 데에도 어려움이 있으며, 비접촉방식인 optical method도 deposition이 optical density를 변화시키는 경우에는 신뢰성이 떨어질 수 밖에 없다. 정확한 온도측정은 기판의 온도제어와 직결되는데, Colgan 등 (1989)은 lamp heating의 경우에 thermocouple 방법과 pyrometer를 사용한 방법을 비교실험을

한 결과 thermocouple을 사용하는 것이 상대적으로 유리하다고 보고하였다.

기판을 직접 lamp로 가열하기도 하지만 기판을 susceptor위에 올려놓고 lamp로 susceptor를 가열하는 간접방법도 있다. Resistant heating이나 induction heating의 경우에는 그 특성상 간접가열 일수 밖에 없다. 이러한 경우에는 susceptor와 기판 사이의 열전달을 조사할 필요가 있다. 室田淳一등(1985)에 의하면 상압하에서는 기판은 도의 균일성이 기판과 susceptor와의 밀착도에 의해서 영향을 받지만 반응기압력이 0.005기압 이하에서는 복사열전달이 지배하게 되므로 밀착도는 중요하지 않다. 실제로 poly-silicon의 증착에서 wafer와 susceptor사이의 거리를 2mm로 유지하였을 때에 균일한 두께의 박막제조가 가능하였다고 보고하였다.

Schmitz 등(1988)은 반응기 내부압력이 susceptor와 wafer사이의 열전달에 미치는 영향을 해석하였다. 가스의 thermal conductivity는 압력이 낮아 질수록 감소하는 반면 복사는 압력의 영향을 받지 않는다. 따라서 상압에서는 가스상의 전도가 열전달을 지배하지만 압력이 낮아짐에 따라서 전도에 의한 열전달은 작아지며, 1 torr 이하의 압력에서는 가스의 thermal conductivity가 충분히 작아져서 복사열전달이 오히려 열전달을 지배하게 된다(표 2.4). 그러므로 susceptor온도 등의 다른조건이 같더라도 wafer온도는 반응기 압력의 영향을 받게된다. 가스의 종류에 따라서 thermal conductivity가 다르므로 가스종류의 영향도 있음은 물론이다.

반응기 및 반응종류에 따라서는 반응물질의 고갈을 보정해주

기 위해서 고의로 반응기 내부에 온도구배를 도입하는 수도 있는데 Foster등(1986)에 의하면 섭씨 40도까지의 온도차를 가지는 경우도 있다고 한다.

Table 2.4 Radiative Heat transfer Rate and Conductive Heat transfer between wafer and susceptor.

p	100xE _c	100xE _r
mTorr	Watt/cm ²	Watt/cm ²
0	0	24
50	2.2	"
100	4.4	"
200	8.8	"
500	22	"
1000	43	"
1.E4	351	"
1.E5	1,229	"
1.E6	1,637	"

For H₂, T₁=637K, T₂=573K, γ=1 φ=1, α=0.2, ε₁=ε₂=0.6 λ=1.7
E-3 W/cm K, d=0.01cm.

4. 농도분포

VLSI관련 wafer processing에서 wafer-to-wafer, intra-wafer film thickness uniformity가 중요한 까닭으로 인하여, CVD reactor

analysis 혹은 simulation 연구결과가 문헌에 많이 발표되어 있다. CVD에 있어서 농도 분포는 해석대상에 따라서 scale이 크게 다를 수 있다. 즉 반응기 크기는 일반적으로 수십 센티미터 내지 그 이상이며, silicon wafer의 경우는 10cm에서 20cm 정도이고, 응용분야가 좀 다르기는 하지만 CVI(Chemical Vapor Infiltration)의 경우는 센티미터 정도이다. 그리고 VLSI에서 집적도가 증가할수록 문제가 되는 미세 patteren형성의 경우, via hole 또는 trench의 filling에서는 마이크론 단위에서의 농도분포가 중요하다(그림2.3).

대면적 박막제조에서는 반응기규모에서의 농도분포가 중요하다. 기판과 접촉하고 있는 가스의 농도를 균일하게 유지하는 것은 가스공급방법, 기판에서의 증착속도, 즉 가스의 소모속도 등에 의해 지배받는다. 이때에 관계되는 parameter들은 가스의 공급량, 속도, 가스의 물성(밀도, 점도, diffusion coefficient, 등등), 기판의 크기, 기판표면에서의 화학반응속도 등이다.

poly-silicon 증착용 horizontal Hot-Wall LPCVD 반응기의 경우에는 100장 이상의 silicon wafer를 boat 위에 얹어 batch 방식으로 증착 하는것이 생산성이 좋아서 널리 이용되고 있다. 이때에 많은 wafer 위에 증착이 일어나므로 원료가스의 소모에 의해 가스 농도의 구배가 존재할 수 있으며, 또 boat 위에 wafer들이 좁은 간격으로 촘촘히 놓여져 있어서 반응가스가 deposition이 일어나는 wafer 표면으로 이동하는 속도가 충분치 못할 가능성이 존재한다. 이러한 현상은 다공성 촉매 pellet에서, pore 중의 mass transfer와 surface chemical reaction과의 관계와 유사하다. 이미 많은 연구가

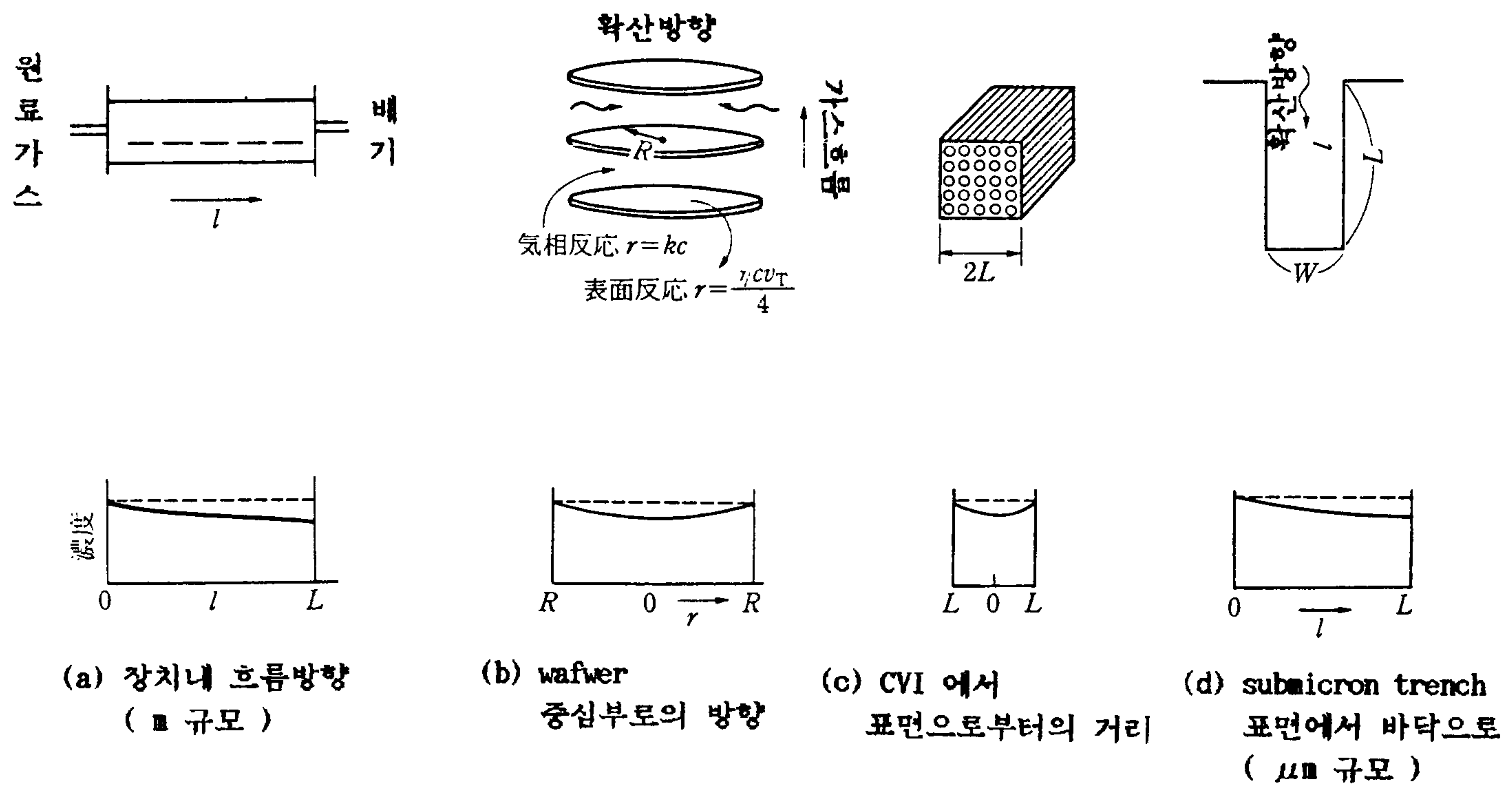


Figure 2. 3 Variation of Gas Concentration in CVD Reactors.

이루어져 있는 catalyst pellet으로부터 연구결과를 원용하여, Thiele modulus와 유사한 무차원수의 개념을 도입하여 LPCVD 반응기 해석을 수행한 결과는 문헌에 보고되어 있다(그림 2.4).

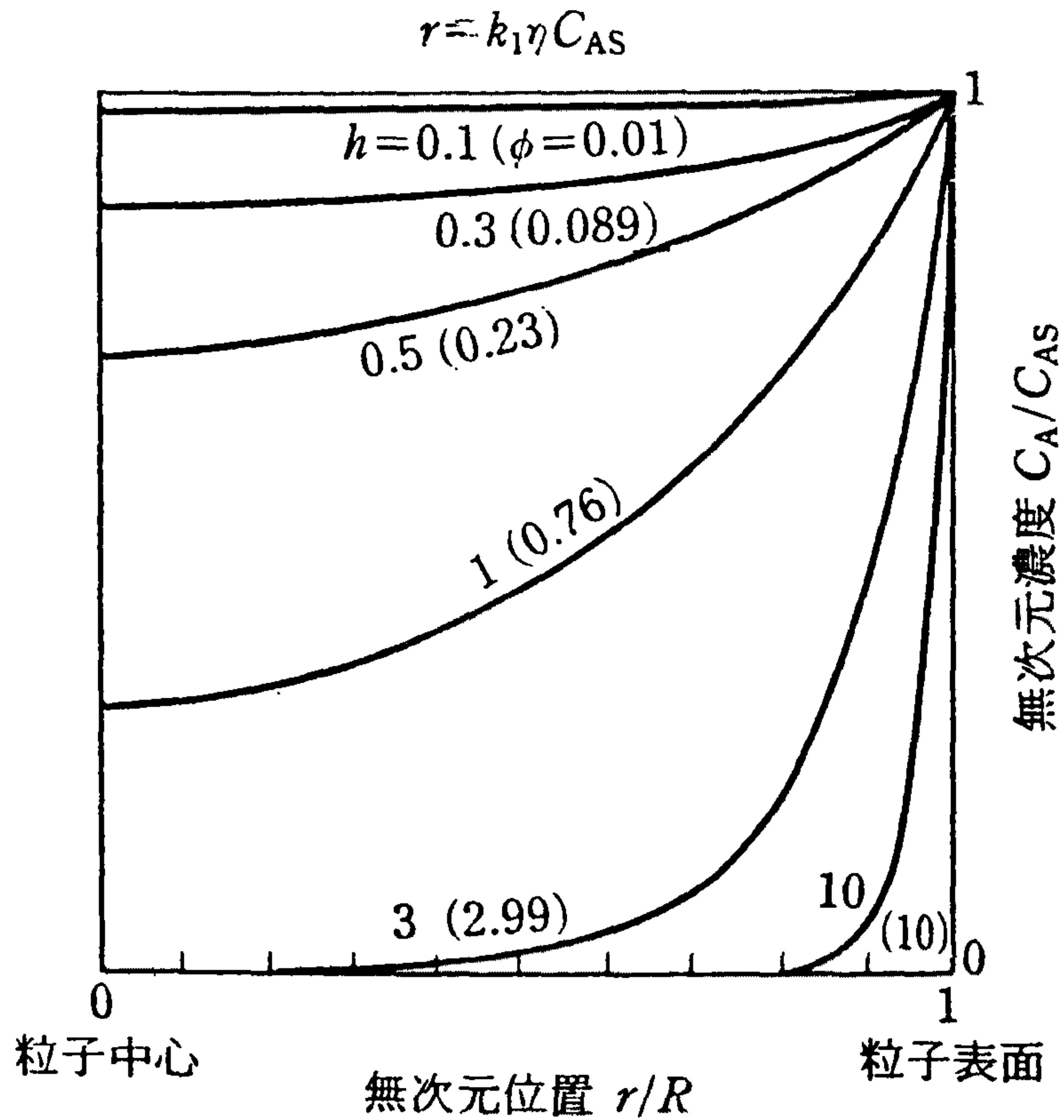


Figure 2. 4 Thiele modulus and Concentration Profile.

5. 균일도의 유지

대면적에서도 균일도를 유지하기 위한 방안으로 다음의 여러 가지를 생각해 볼수 있다.

1) 가스공급방법의 보완

Shower head가 좋은 예인데 증착되는 만큼 그 부위에 fresh gas feeding을 해주면 가스농도를 일정하게 유지하는데 큰 도움을 줄 수 있다.

2) 반응기형태

기판을 기울여 놓는다거나 혹은 internal을 설치하여 가스농도 및 증착속도의 균일성 향상을 꾀할 수 있다(그림 2.5).

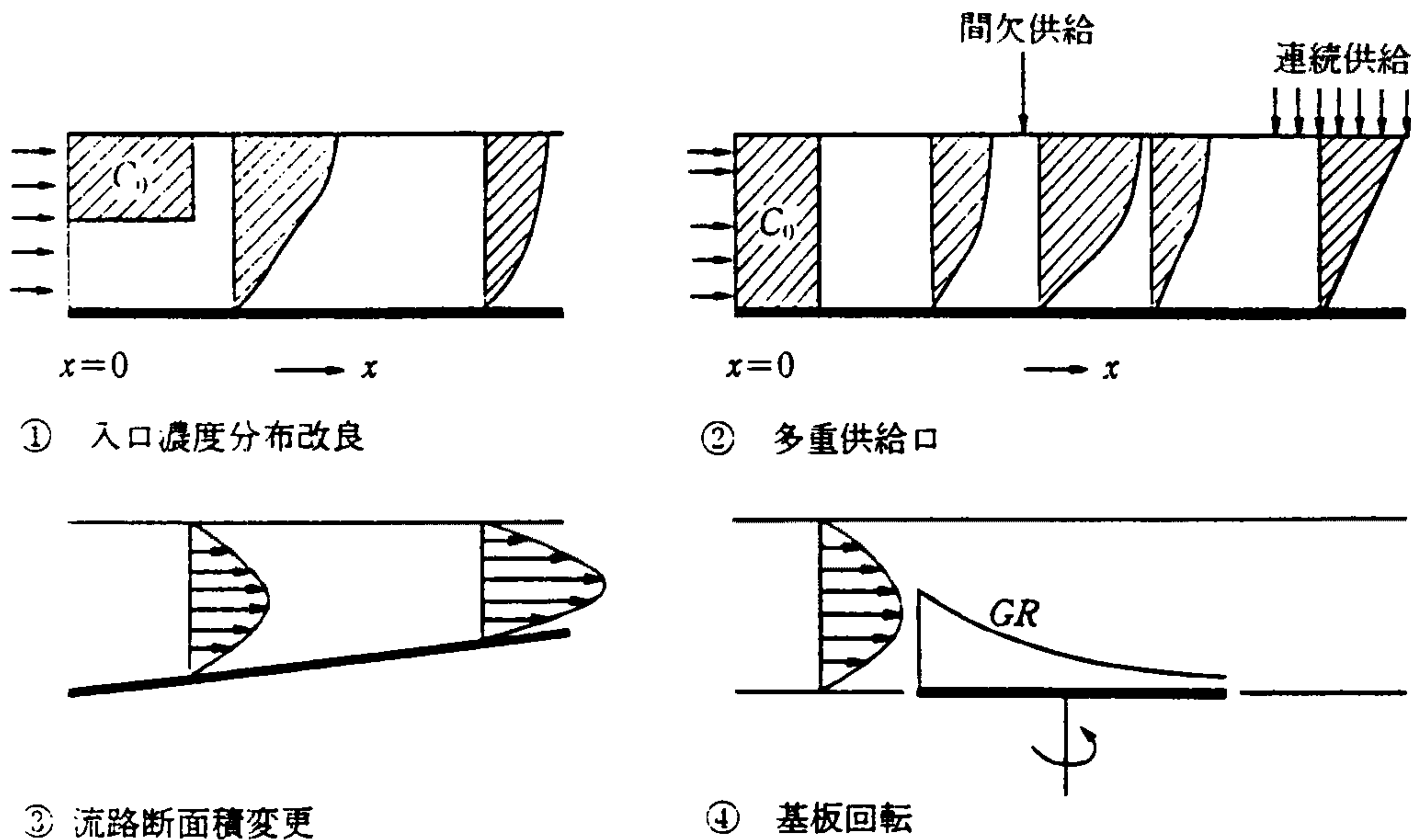


Figure 2. 5 Horizontal Flow Reactor and Adjustment of Gas Flow.

3) Sacrificial surface

Horizontal type LPCVD 반응기의 경우 맨 앞의 웨이퍼는 균일도가 나쁠 수도 있는데 이 경우에 dummy wafer를 집어 넣어

문제를 해결할 수 있다. 같은 원리를 다른 경우에도 적용할 수 있다.

4) 기판의 자전 및 공전

반응기 안에 있는 기판을 기계적인 방법에 의해 자전 혹은 공전시킴으로써 각각의 증착부위가 시간적으로 평균하였을때, 비교적 균일한 증착조건을 경험하게 함으로써 균일한 증착을 얻게 할 수 있다.

5) 기판의 이동

기판의 각 부위가 똑같은 증착조건에 놓일 수 있게끔 기판을 일정속도로 반응기를 통과하게 하는 방법인데 roll-to-roll deposition에서 그 예를 쉽게 찾을 수 있다(그림 2.6).

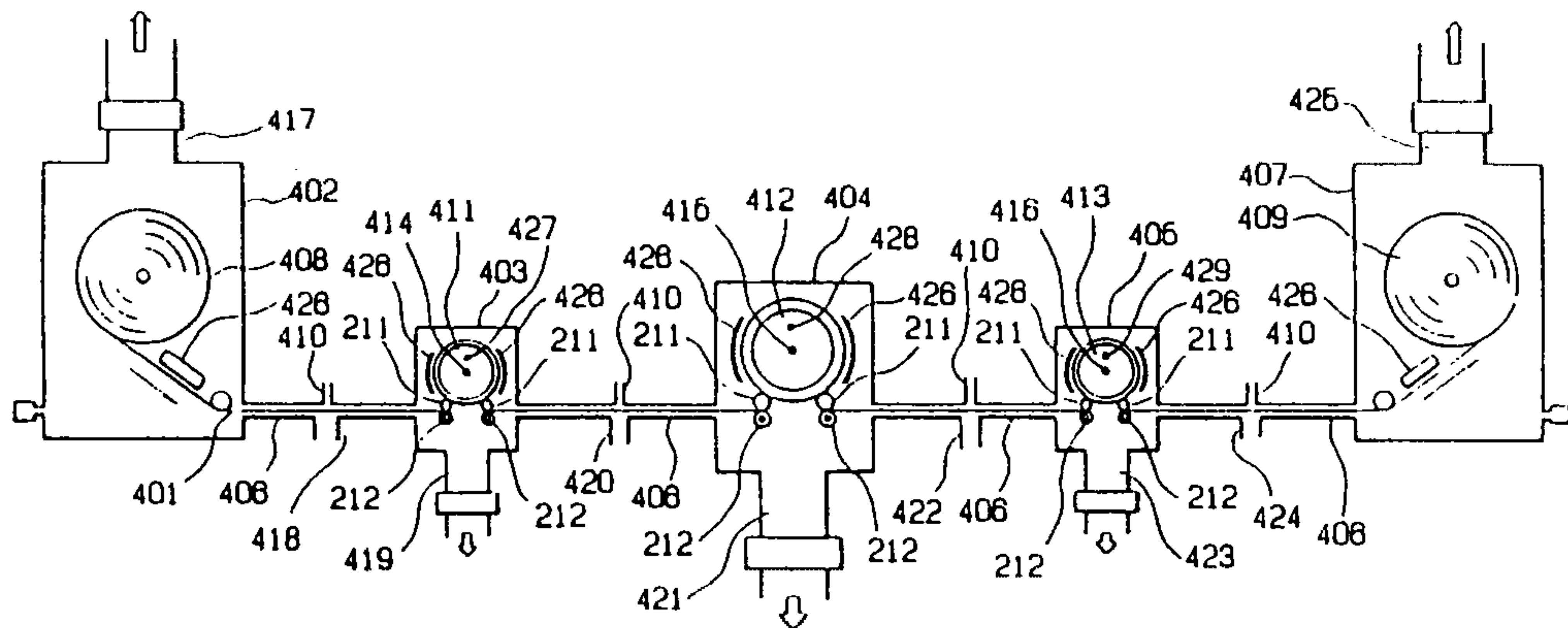


Figure 2. 6 Roll-to-Roll CVD Reactor. (European Patent 0411317 A2)

6. 새로운 Chemistry

CVD의 장점 중의 하나는 같은 물질의 박막증착에도 여러가지의 다른 chemistry가 가능하다는데 있다. 즉 새로운 precursor가 개발되면 반응온도를 낮출 수 있다던가 하는 등의 반응조건도 개선될 수도 있고 또 박막의 물성도 개선시킬 수 있다. 그러므로 대면적 박막증착에 보다 유리한 precursor 혹은 chemical route의 개발도 중요한 역할을 담당할 수 있다.

제 2절 반응기 해석 및 Simulation

반응기를 개발하여 증착실험을 수행하고, 그리고 또 그 결과를 반영하여 반응기를 개조, 보완하는데에는 많은 시간과 노력이 필요하다. 이러한 일을 하는데 있어서 적절한 방법을 사용하여 반응기의 해석/모사를 수행하는 것은 반응기의 설계, 제작, 증착실험의 설계 및 결과해석 등의 여러방면에서 유용하게 이용되어 시간과 노력의 절감에 크게 기여 할수 있다(Fair, 1991).

1. 박막증착모사의 특성

이상적인 reactor modeling/simulation은 주어진 기하학적 형태를 가진 반응기에 대해서 압력, 온도, 가스 유량 및 농도 등의 조업조건에서 증착속도, 박막의 조성 및 물성 등의 예측을 가능케 한다. 체계적으로 여러가지 경우에 대한 계산을 수행함으로써 반응기의 설계와 최적화가 이루어질 수 있다(그림 2.7).

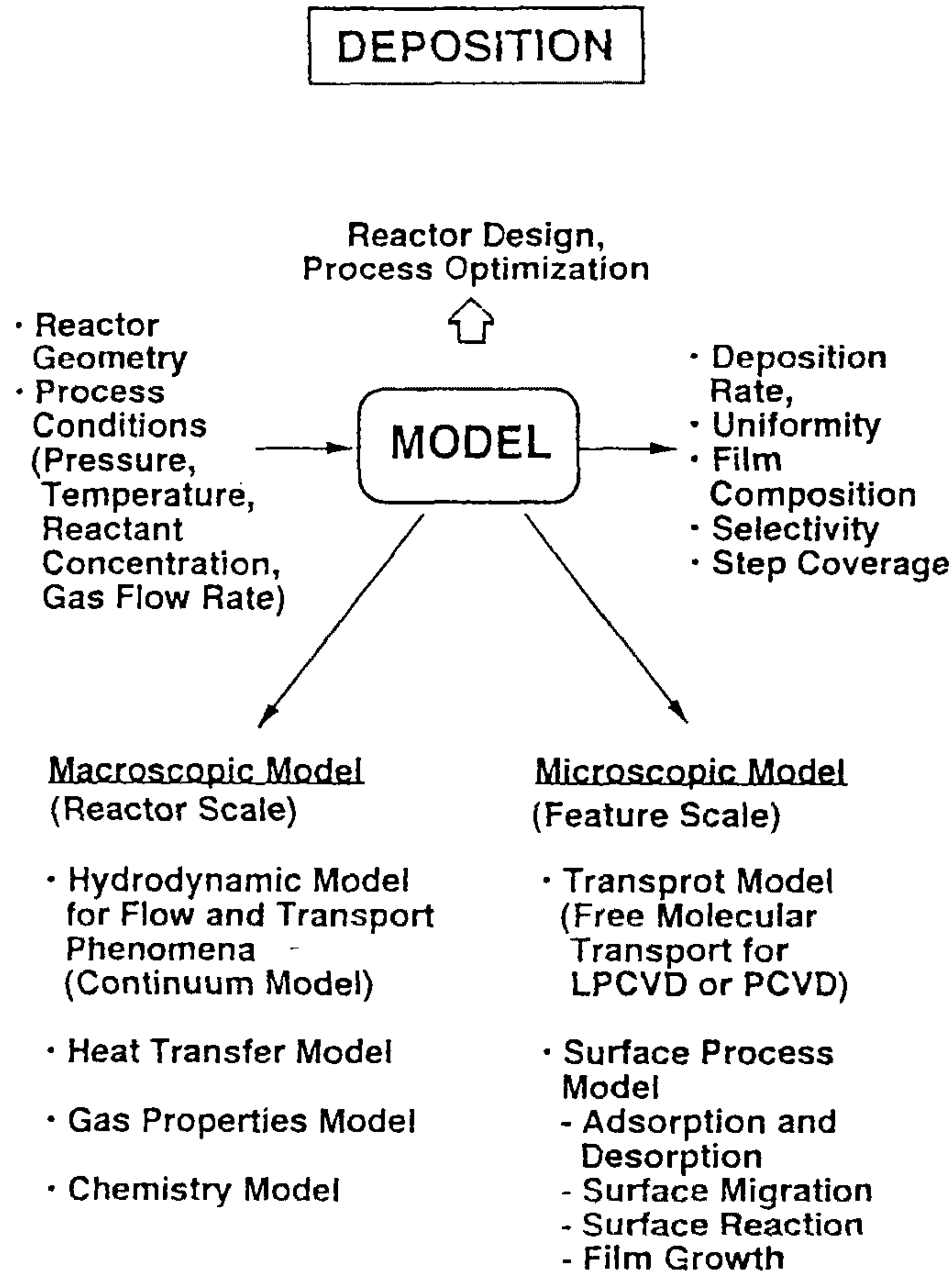


Figure 2. 7 Function of CVD Mathematical Model. (김도현, 1992)

반응기 안에서는 여러가지 물리적·화학적 현상들이 일어나므로 반응기모델은 각각의 현상을 나타내는 sub-model들로 구성된다. 그 중에서 반응기규모로 관계되는 모델은

- gas flow/gas phase mass transfer
- heat transfer
- chemical reaction
- gas properties change with changes of temperature, pressure, and gas composition

등이다.

그리고 microscale의 박막규모에서는

- adsorption/desorption of deposition precursors and reaction products
- surface migration of adatoms
- surface chemical reaction
- film growth

등이 관계된다.

Table 2. 5 Modeling Equations.

Momentum balance:	$\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \mu [\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T] - \frac{2}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \rho \mathbf{g}$
Continuity balance:	$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$
Energy balance:	$\rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T)$
Equation of state:	$\rho = \frac{p \bar{M}}{RT}$
Species balance:	$c \mathbf{v} \cdot \nabla x_i = \nabla \cdot \mathbf{J}_i + \sum_{j=1}^{N_g} v_{ij}^g \alpha_j^g \quad i = 1, \dots, S-1$
Flux relation:	$\mathbf{J}_i = -c D_{im} [\nabla x_i + \alpha_i^T \nabla \ln T]$
	S totals species

Gas flow and Heat transfer

가스의 흐름과 heat balance에서는 conservation equation과 boundary condition에 의해서 계산될 수 있다(Jensen 등(1991), 표 2.5, 표 2.6). 일반적인 화학반응과 다른 점은 CVD반응기에서는 deposition

에 의해서 가스가 substrate 표면에서 소모된다는 점이다. 물론 화학 반응에 따라서는 많은 경우에 deposition surface에서 reaction product gas가 생성된다. 그리고 CVD에서는 증착된 박막의 형태, 조성 및 물성 등이 엄격하게 제어되어야 한다.

Heat transfer에서는 conduction, convection 및 radiation이 모두 다 고려 되어야 하는 경우도 많다.

Table 2. 6 Boundary Conditions.

Variable	Inlet	Wall	Outlet
Velocity	Specified velocity profile	$\mathbf{v} = \mathbf{0}$	$\frac{\partial v_n}{\partial n} = 0$
Temperature	Specified inlet temperature	(i) $T = T_w$ (ii) $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ (iii) detailed heat transfer model for wall including radiation from susceptor (10)	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$
Species	Specified inlet concentrations	$\mathbf{J}_i \cdot \mathbf{n} = 0$ nonreacting surfaces $\mathbf{J}_i \cdot \mathbf{n} = - \sum_{j=1}^{N^s} v_{ij}^s \mathcal{R}_j^s$ deposition surfaces	$\frac{\partial x_i}{\partial n} = 0$

화학반응

가스화합물이 기판표면에 화학반응에 의해 증착되는 과정이 그림 2.8에 도시되어 있다. 증착되는 물질이 한가지 원소로만 구성되어

있고 원료가스가 하나의 화합물인 경우에도 관계되는 화학반응은 매우 복잡할 수 있다.

Jensen 등(1989)은 GaAs증착에 있어서 표 2.7에 수록되어 있는 여러 화학반응 들을 포함시켜 모델계산을 하였다. 일반적으로는 반응중간생성물들의 농도가 낮고, 측정이 용이치 않을 뿐만 아니라 반응속도 또한 알기 힘들다.

따라서 관계되는 반응을 중요한 몇가지로 단순화시켜 모사하는 경우가 많다.

증착표면에서 일어나는 surface chemistry에 관한 정보는 더욱 얻기가 어려우므로(Zangwill, 1988) 많은 경우에는 실제 표면에서 일어나는 복잡한 현상을 단순화시킬 수 없다.

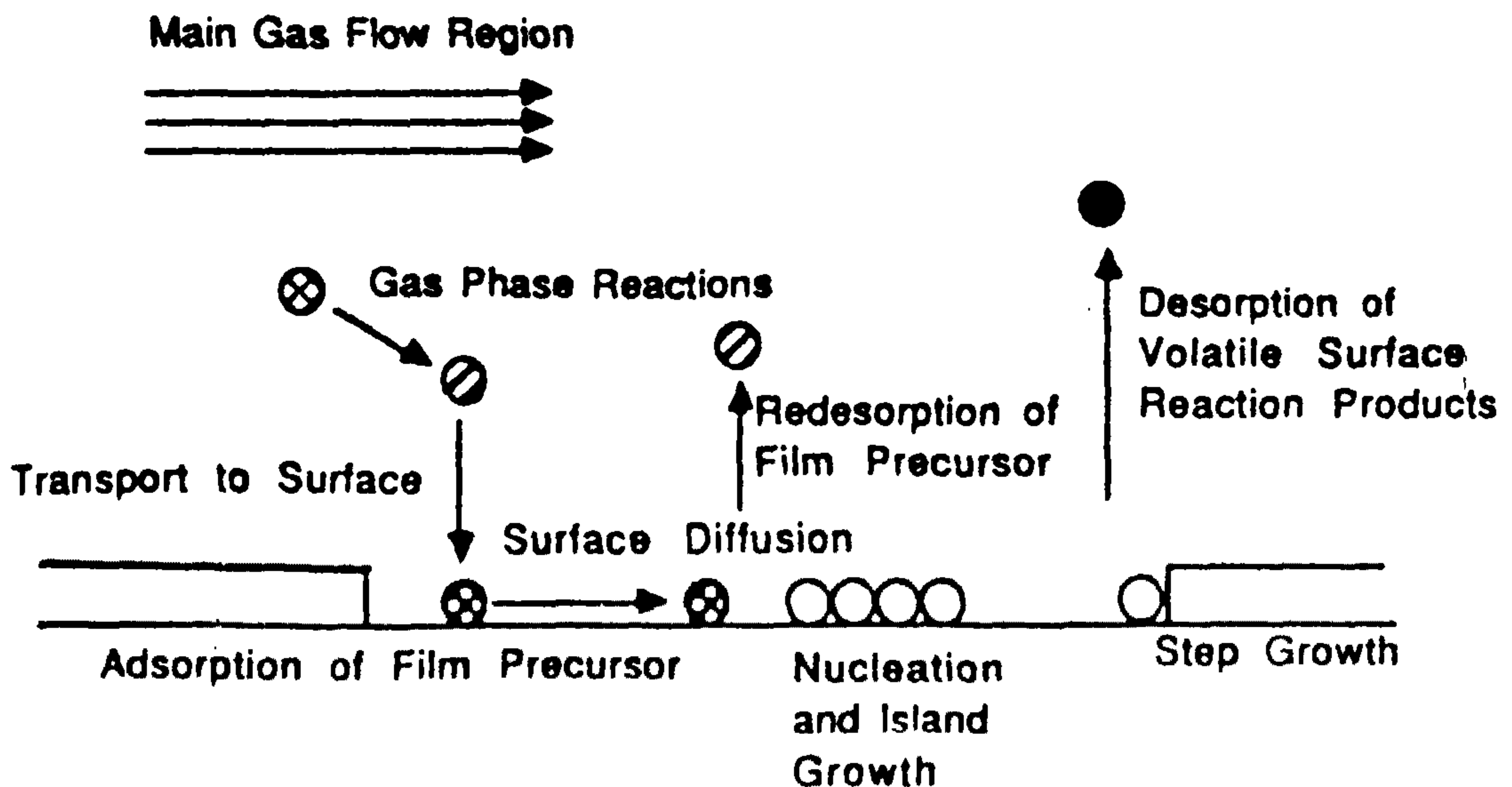


Figure 2. 8 Schematic of Transport and Reaction Process Underlying CVD.

Table 2. 7 Gas Phase and Surface Reaction Mechanism for Growth of Gaas from TMG and Arsine.

Gas-phase Reactions		Surface Reactions	
$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$	$\rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{CH}_3\cdot$	$\text{H}\cdot + \text{S}_i$	$\rightarrow \text{H}_i^*, i=\text{A,G}$
$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2$	$\rightarrow \text{GaCH}_3 + \text{CH}_3\cdot$	$\text{CH}_3\cdot + \text{S}_i$	$\rightleftharpoons (\text{CH}_3)_i^*$
$\text{CH}_3\cdot + \text{AsH}_3$	$\rightarrow \text{AsH}_2 + \text{CH}_4$	$\text{GaCH}_3 + \text{S}_G$	$\rightleftharpoons \text{GaCH}_3^*$
$\text{CH}_3\cdot + \text{H}_2$	$\rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}\cdot$	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{S}_G$	$\rightarrow \text{GaCH}_3^* + \text{CH}_3\cdot$
$\text{H}\cdot + \text{H}\cdot + \text{M}$	$\rightarrow \text{H}_2 + \text{M}$	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 + \text{S}_G$	$\rightarrow \text{GaCH}_3^* + 2\text{CH}_3\cdot$
$\text{CH}_3\cdot + \text{H}\cdot + \text{M}$	$\rightarrow \text{CH}_4 + \text{M}$	$\text{AsH} + \text{S}_A$	$\rightleftharpoons \text{AsH}^*$
$\text{CH}_3\cdot + \text{CH}_3\cdot$	$\rightarrow \text{C}_2\text{H}_6$	$\text{AsH}_2 + \text{S}_A$	$\rightarrow \text{AsH}^* + \text{H}\cdot$
$\text{GaCH}_3 + \text{CH}_3\cdot$	$\rightarrow \text{GaCH}_2 + \text{CH}_4$	$\text{AsH}_3 + \text{S}_A$	$\rightarrow \text{AsH}^* + \text{H}_2$
$\text{GaCH}_2 + \text{H}\cdot$	$\rightarrow \text{GaCH}_3$	$\text{CH}_3\cdot + \text{H}_i^*$	$\rightarrow \text{CH}_4 + \text{S}_i, i=\text{A,G}$
$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 + \text{CH}_3\cdot$	$\rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2 + \text{CH}_4$	$\text{H}\cdot + (\text{CH}_3)_i^*$	$\rightarrow \text{CH}_4 + \text{S}_i, i=\text{A,G}$
$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2 + \text{H}\cdot$	$\rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_3$	$\text{H}_G^* + (\text{CH}_3)_A^*$	$\rightarrow \text{CH}_4 + \text{S}_A + \text{S}_G$
$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2$	$\rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 + \text{CH}_3\cdot$	$\text{H}_A^* + (\text{CH}_3)_G^*$	$\rightarrow \text{CH}_4 + \text{S}_A + \text{S}_G$
$\text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2$	$\rightarrow \text{GaCH}_2 + \text{CH}_3\cdot$	$\text{H}_A^* + \text{H}_G^*$	$\rightarrow \text{H}_2 + \text{S}_A + \text{S}_G$
$\text{Ga}(\text{CH}_3)_i + \text{H}\cdot$	$\rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_{i-1} + \text{CH}_4, i=2,3$	$(\text{CH}_3)_A^* + (\text{CH}_3)_G^*$	$\rightarrow \text{C}_2\text{H}_6 + \text{S}_A + \text{S}_G$
$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{CH}_3\cdot$	$\rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 + \text{CH}_4$	$\text{GaCH}_3^* + \text{AsH}^*$	$\rightarrow \text{GaAs} + \text{CH}_4 + \text{S}_G + \text{S}_A$
$\text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 + \text{H}\cdot$	$\rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_2$	$\text{AsH}^* + \text{AsH}^*$	$\rightarrow \text{As}_2 + \text{H}_2 + 2\text{S}_A$
		$\text{CH}_3\cdot + \text{AsH}^*$	$\rightarrow \text{As}^* + \text{CH}_4$
		$\text{As}^* + \text{As}^*$	$\rightleftharpoons \text{As}_2 + 2\text{S}_A$
		$\text{GaCH}_3^* + \text{As}^*$	$\rightarrow \text{GaAs} + \text{CH}_3\cdot + \text{S}_G + \text{S}_A$
Surface Reactions (Carbon Incorporation)			
$\text{GaCH}_2 + \text{S}_G + \text{S}_A$	$\rightarrow \text{GaC} + \text{H}_2$		
$\text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 + \text{S}_G + \text{S}_A$	$\rightarrow \text{GaC} + \text{CH}_3\cdot + \text{H}_2$		
$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2 + \text{S}_G + \text{S}_A$	$\rightarrow \text{GaC} + 2\text{CH}_3\cdot + \text{H}_2$		



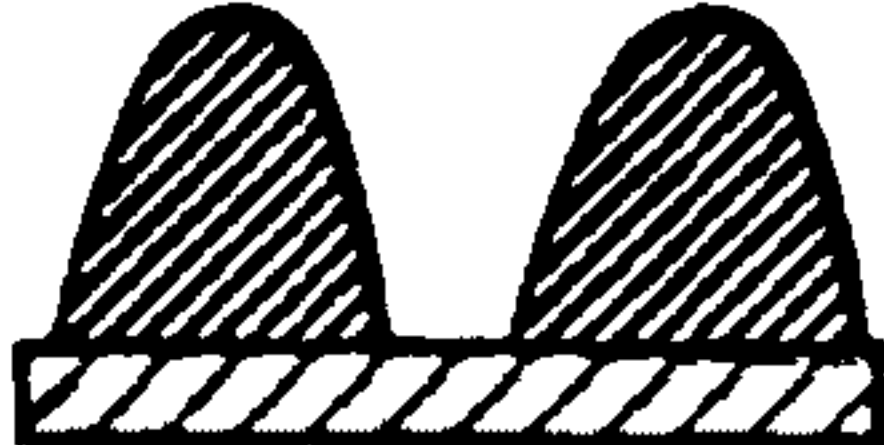


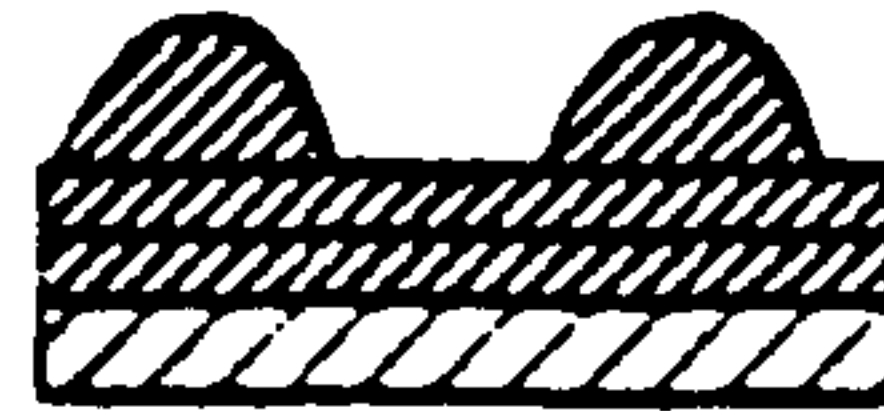



	Surface Coverage		
	$\theta < 1 \text{ ML}$	$1 \text{ ML} < \theta < 2 \text{ ML}$	$2 \text{ ML} < \theta$
(a)			
(b)			
(c)			

Figure 2. 9 Crystal Growth Modes : (a) three-dimensional island (Volmer-Weber) growth, (b) layer-plus-island (Stranski-Kastanov) growth, and (c) layer-by-layer (Frank-van der Merwe) growth.

microscale model

많은 연구가 진행되어 온 epitaxy의 경우에 crystal growth에 관해서 Volmer-Weber, Stranski-Kastanov, Frank-Van der Merwe 등의 mode(그림 2.9)에 관한 토의가 있지만 일반적으로 bulk gas phase에서의 condition으로부터 microscale의 현상을 추론하는 것은 불가능하다. ULSI에서 step coverage가 중요한 까닭으로 특히 텅크스텐증착의 경우에 via hole 또는 trench filling에 있어서의 step coverage에 관한 모델들이 보고되어 있다(그림 2.10). Trench의 step

coverage 모사를 위해서 Thiele modulus 개념을 이용한 diffusion equation을 세우는 방법, molecule의 궤적을 integro-differential equation으로 모사하는 방법, 그리고 Monte Carlo simulation 방법 등이 각각 이용되고 있다.

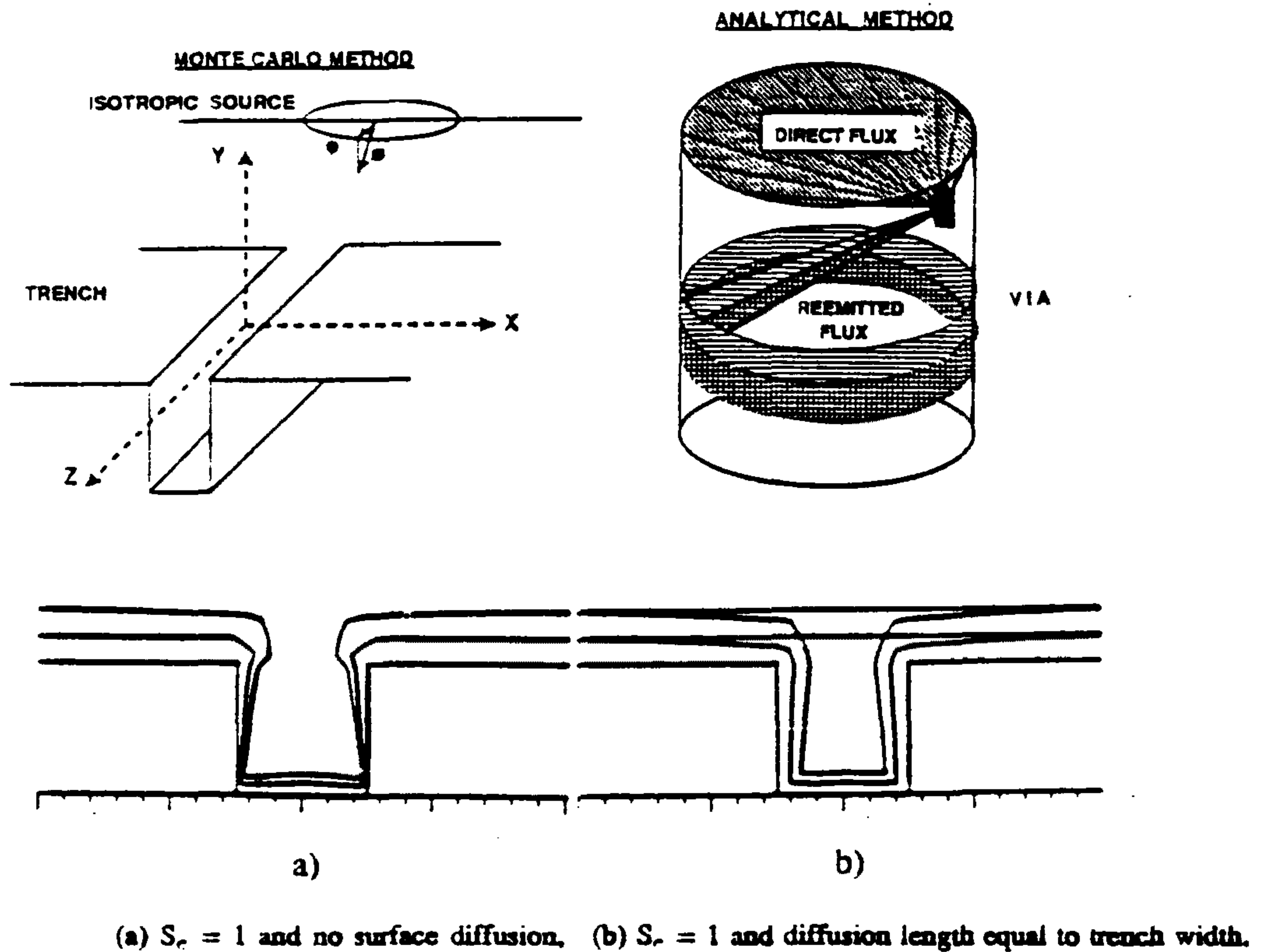


Figure 2.10 Step Coverage in microscale.

2. 문헌 상의 CVD 반응기의 모사

따라서 CVD reactor analysis/simulation에 관해서는 많은 연구 결과가 문헌에 보고되어 있는데, 단순한 해석으로부터 supercomputer의 사용을 필요로 하는 복잡한 것까지 다양하다. 그

리고 이에 관한 review들도 보고되고 있다(예를 들면 Jensen 등 (1991), Jensen과 Kern(1991)), Jensen과 Kern(1991)은 CVD반응기를 해석에서 표 2.8에 수록된 dimensionless number들이 관계한다고 하였으며 그들의 수치범위도 또한 같은 표에 수록하였다.

Table 2. 8 Dimensionless Parameter Groups in CVD.

Name	Definition	Physical interpretation	Typical order of magnitude
Knudsen	$Kn = \frac{\lambda}{L}$	$\frac{\text{mean free path}}{\text{characteristic length}}$	$<10^{-2}$
Prandtl	$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$	$\frac{\text{momentum diffusivity}}{\text{thermal diffusivity}}$	~ 0.7
Schmidt	$Sc = \frac{\nu}{D}$	$\frac{\text{momentum diffusivity}}{\text{mass diffusivity}}$	1-10
Reynolds	$Re = \frac{\langle v \rangle L}{\nu}$	$\frac{\text{momentum flux by convection}}{\text{momentum flux by diffusion}}$	$10^{-1}-10^2$
Peclet (thermal)	$Pe_h = Re Pr$	$\frac{\text{thermal flux by convection}}{\text{thermal flux by diffusion}}$	$10^{-1}-10^2$
Peclet (mass)	$Pe_m = Re Sc$	$\frac{\text{mass flux by convection}}{\text{mass flux by diffusion}}$	$10^{-1}-10^3$
Grashof (thermal)	$Gr_t = \frac{g\beta_t L^3 \Delta T}{\nu^2}$	$\frac{\text{buoyancy force}}{\text{viscous force}}$	1- 10^5
Grashof (solutal)	$Gr_s = \frac{g\beta_c L^3 \Delta c}{\nu^2}$	$\frac{\text{buoyancy force}}{\text{viscous force}}$	1- 10^2
Rayleigh (thermal)	$Ra_t = Gr_t Pr$	$\frac{\text{buoyancy force}}{\text{viscous force}}$	1- 10^5
Rayleigh (solutal)	$Ra_s = Gr_s Sc$	$\frac{\text{buoyancy force}}{\text{viscous force}}$	1- 10^2
Damkohler (gas phase)	$Da_g = \frac{R(C.T)_{ret} L}{C_{ret} \langle v \rangle}$	$\frac{\text{characteristic time for flow}}{\text{characteristic time for gas-phase reaction}}$	$10^{-3}-10^3$
Damkohler (surface)	$Da_s = \frac{R(C.T)_{ret} L}{C_{ret} D}$	$\frac{\text{characteristic time for diffusion to surface}}{\text{characteristic time for surface reactions}}$	$10^{-3}-10^3$

대면적박막제조와 관련하여 문헌을 정리해 볼때 다음과 같은 사항들이 주목을 끈다.

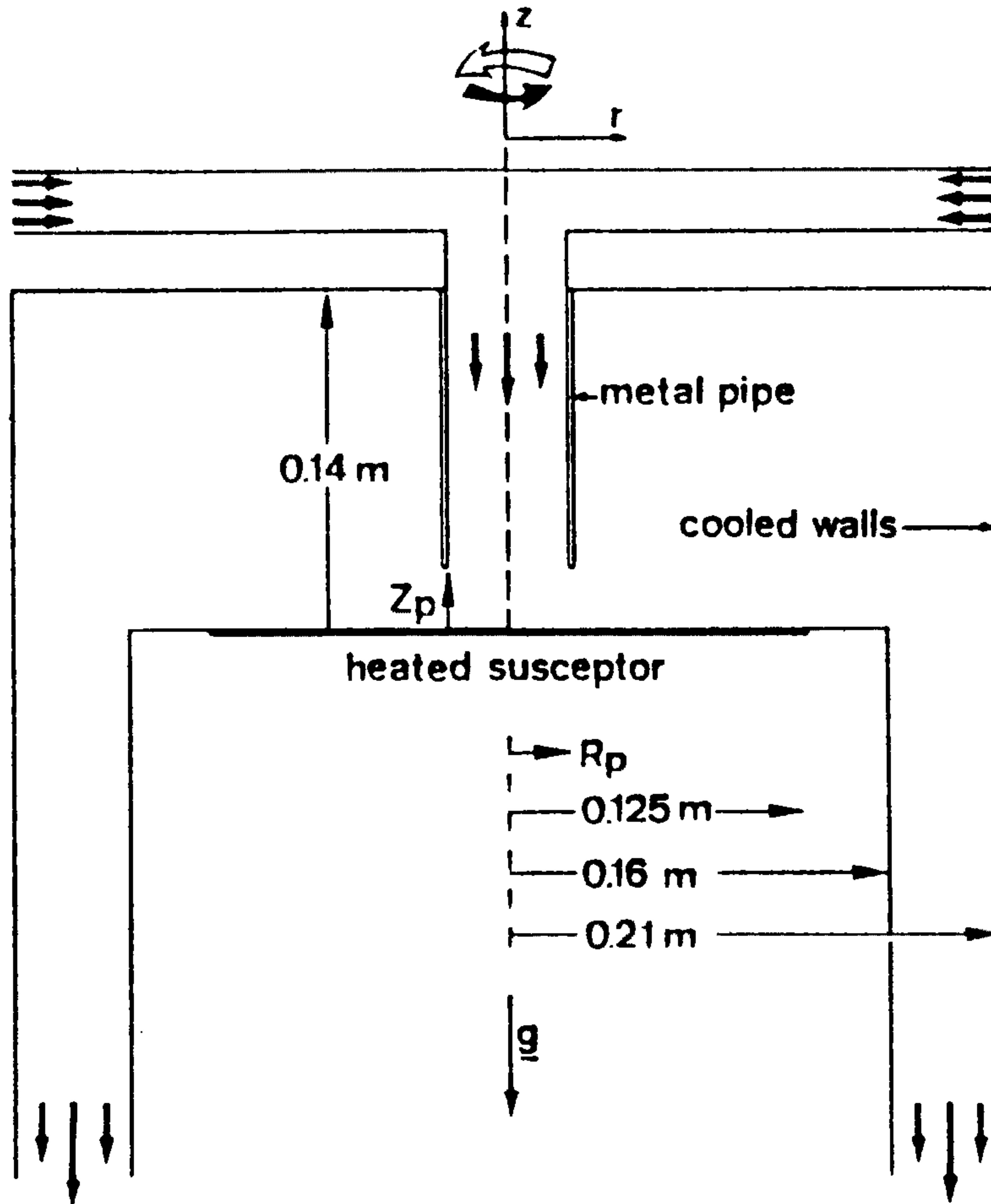


Figure 2.11 Impinging Jet Type CVD Reactor

Horizontal CVD Reactor

주로 silicon epitaxial growth용 CVD Reactor를 대상으로 연구되었는데 반응온도와 비교적 높은 것이 특징이다. 반응가스가 wafer와 평행되게 흐르는 것이 특징인데 반응가스가 한쪽으로 부터

공급되므로 deposition에 의해 반응가스의 고갈을 보정해주기 위해서 wafer를 기울이는 방법이 고안되었고 따라서 기울임의 영향에 관해서도 연구되었다.

Impinging Jet Type CVD Reactor

Single Wafer Type 혹은 연구용 CVD Reactor의 경우에는 반응가스를 wafer에 수직되게 공급하는 Impinging Jet Type의 반응기가 흔히 사용된다. 가스의 흐름을 axisymmetry로 볼 수 있어서 2차원 모델로도 정교한 반응기해석이 가능하다는 잇점이 있다(Keijn 등 (1991), 그림 2.11).

3. 수치해석기법

반응기 모사의 목적, 연구여건에 따라 mathematical model의 정교성 및 이에 따른 수치해석의 기법도 달라진다. 반응기의 1차원, 2차원 혹은 3차원으로 모사할 수 있으며(표 2.9), 모사대상에 포함되는 사항들에 따라서는 모사기법, 복잡성이 달라진다(그림 2.12).

단순한 1차원적 모델은 비교적 계산시간도 적게 들이고 해를 구할 수 있으나 유용성에 한계가 있다. 반면에 3차원 모델은 여러가지 실제적인 현상의 해석 및 예측에는 효과적이지만 계산이 복잡하여 supercomputer의 사용이 불가피해지며 계산시간이 많이 소요되어 비용 또한 많이 든다.

연구자가 직접 balance equation들로 부터 computer algorithm/code를 만들어 계산하는 경우와 상업적으로 이용가능한 program package를 이용하여 계산하는 경우로 대별해 볼 수 있다. 문헌에

Table 2. 9 Computational Considerations in CVD Modeling.

Model	Computer	Typical time to converged solution	Typical storage required
1D model with chemical kinetics	Workstation	seconds-minutes	< 1 Mword
2D model of horizontal reactor midplane or axisymmetric model of vertical reactor with mass transfer limited growth.	Workstation	minutes	1-10 Mword
2D model of horizontal reactor midplane or axisymmetric model of vertical reactor including chemical kinetics and wall heat transfer description.	Supercomputer	minutes	5-25 Mword
3D models of horizontal or vertical reactors with mass transfer limited growth.	Supercomputer	minutes-hours	25-100 Mword
3D models of horizontal or vertical reactors including simple chemical kinetics and wall heat transfer.	Supercomputer	hours	>100 Mword
3D models of horizontal or vertical reactors including detailed chemical kinetics for gas phase and surface reactions.	Next generation multiprocessor supercomputer	??	>500 Mword

인용된 package로는 PHOENICS와 FLUENT등이 있다.

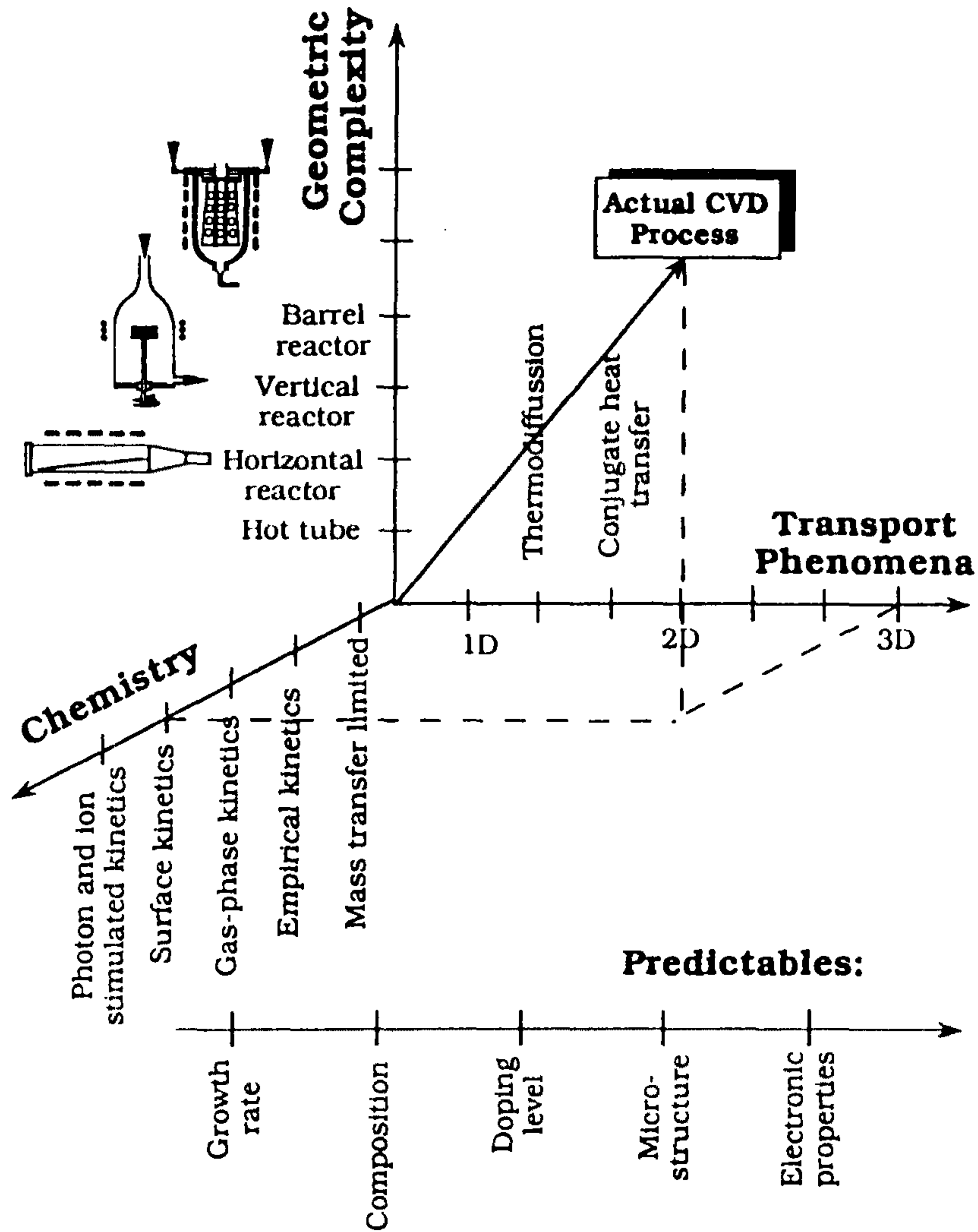


Figure 2.12 Schematic Diagram of Transport, Chemistry and Geometric Complexity in CVD Reactor Models.

PHOENICS는 영국의 CHAM사(Concentration Heat and Momentum Ltd.)에 의해 개발되었는데 이 회사는 런던의 Imperial College의 D.B. Spalding교수가 1974년에 설립하였다. PHOENICS는

Parabolic, Hyperbolic Or Elliptic Numerical Ontegration Code Series의 약어이며, 유체의 흐름, 열전달, 및 화학반응을 포함하는 시스템의 모사할 수있는 package이며 finite-volume method에 기초를 두고 있다. Ulacia(1990)는 PHOENICS를 사용하여 CVD 반응기를 모사한 결과 가스농도, 온도분포등의 매우 유용한 결과를 얻었다고 보고하였다. 우리나라에는 한국과학기술연구원 부설 시스템공학연구소에 PHONICS가 설치되어 있다.

FLUENT는 미국의 Creare사에 의해 1980년대에 개발되었다. 기본 algorithm은 PHONICS와 마찬가지로 finite-volume method에 기초를 두었으며, 유체의 흐름, 열전달, 화학반응 등을 동시에 취급할 수 있는 package이다. 따라서 상업적으로도 PHOENICS와 경쟁 관계에 있다. Jasinski와 Kang(1990)은 FLUENT를 이용하여 텅크스텐 CVD 반응기를 모사하였다. Gokolu 등(1991)은 filment 위에 실리콘을 증착하는 공정을 FLUENT를 사용하여 모사하였다.

직접 computer code를 만들 경우에는 finite element method를 사용하기도 하며(Oh, 1990) 또 finite difference method 혹은 finite volume method를 사용하기도 한다. Finite volume method를 사용할 경우에는 SIMPLER algorithm(Patankar(1980))이 흔히 이용되고 있다 (Chinoy(1991), Zhu(1991)).

제 3 절 CVD반응기


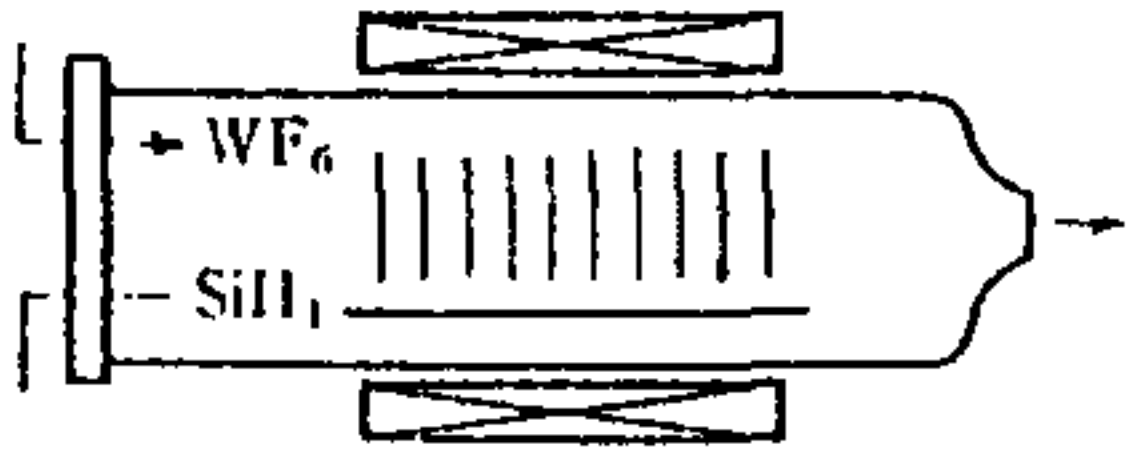
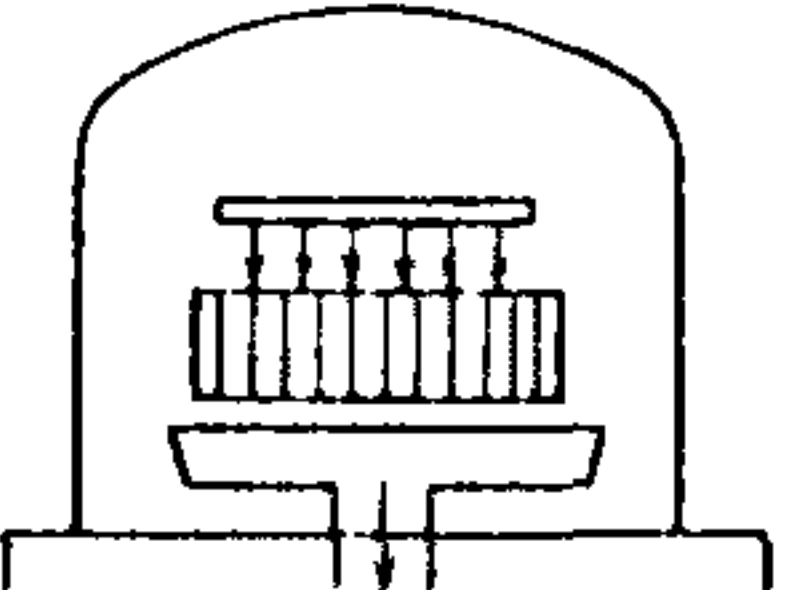
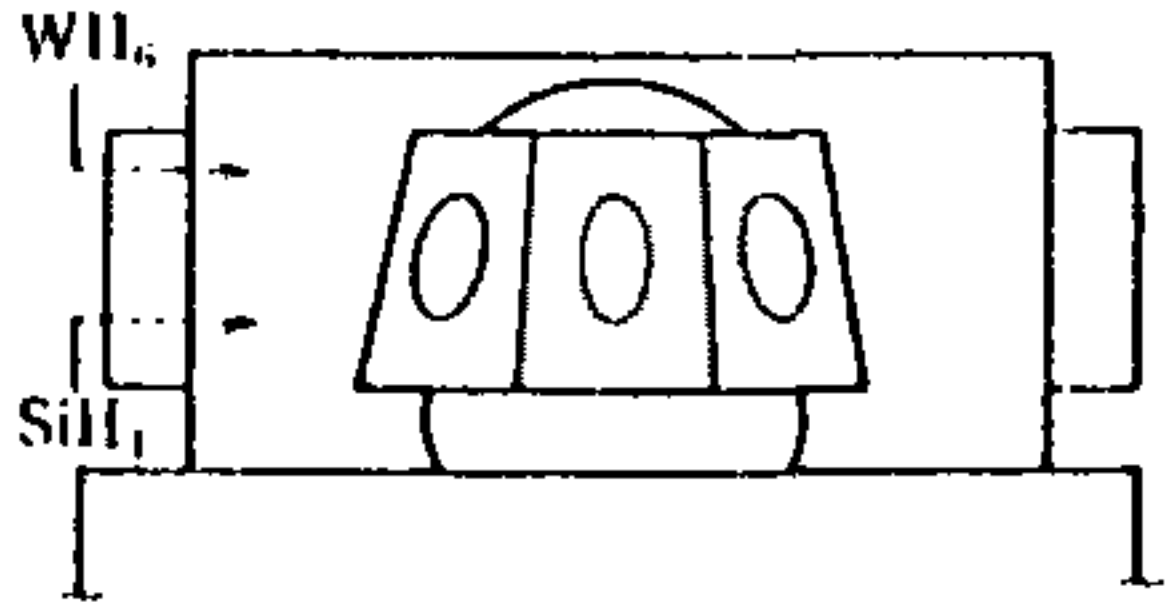
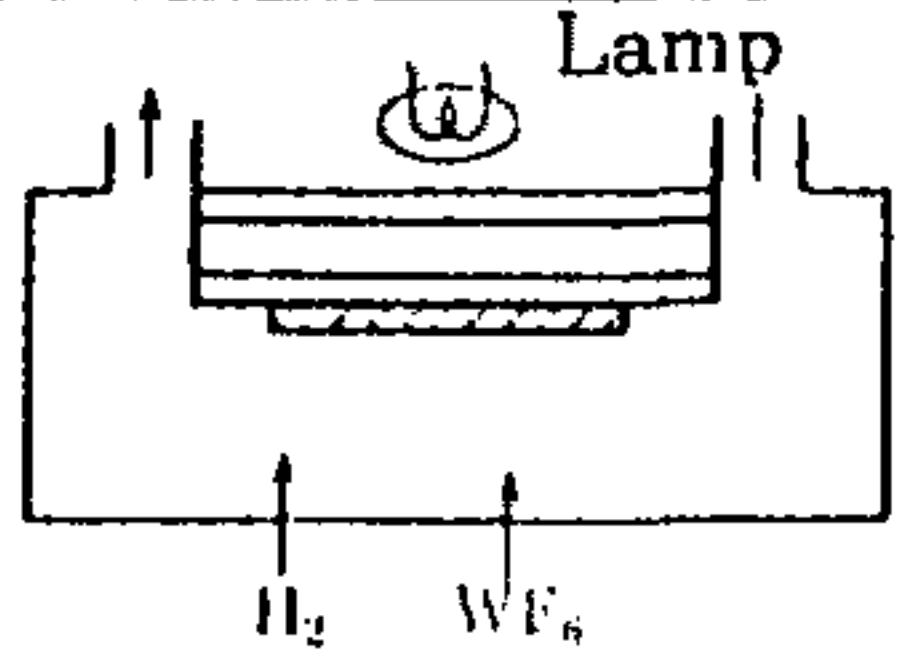
CVD반응기는 용도에 따라 그 형태가 다양하고, 또 기술의 진보에 의해 보다 더 목적에 적합한 형태로 바뀌어진다. 그 한

예로 텅크스텐 증착용 CVD 반응기의 개발을 들 수 있다. VLSI에서 집적도가 높아짐에 따라 기존에 사용되고 있는 inger-connection line으로 사용되는 poly-silicon으로는 충분치 않아서 보다 전기저항도가 낮은 텅크스텐으로 대체하기 위한 연구개발이 1980년대에 활발히 진행되었다. 표 2.10에서 보듯이 1980년 이전에는 Horizontal Type의 단순한 반응기가 사용되었으나 1980년 경에는 poly-silicon 증착에 많이 사용되는 Horizontal Hot-Wall Type의 반응기가 사용되었다. 그후에 Vertical Flow Type의 반응기가 개발되었으며, Barrel Type의 반응기 또한 개발되었다. 그리고 최근에는 Imponging Type의 Single Wafer 반응기가 개발되었다.

대면적

어느 정도의 면적이면 “대면적”인가 하는 것은 상대적인 개념일 수 밖에 없다. Solar Cell의 경우에는 면적이 100 평방센티미터 이상이 되어야 “module”이라 할 수 있고 1000 평방센티미터 혹은 1평방미터 정도가 되어야 본격적인 발전용으로 간주된다. 그 반면에 VLSI/ULSI에서는 이제 8인치 웨이퍼 가공공정이 도입되고 있다. 한편 Flat Display의 경우, Lap Top Computer에는 대각선 10인치 정도의 크기면 적절하지만 HDTV에는 넓은 화면이 요구된다.

Table 2.10 Development of CVD Reactors for Tungsten Deposition.

세 대	방 식	장 치 구 조	maker	이 점	과 제
第 1 世 代 (1980 以前)	<ul style="list-style-type: none"> 상 압 $WCl_6 + H_2$ 		<ul style="list-style-type: none"> 실험기 	<ul style="list-style-type: none"> 장치가 간단 	<ul style="list-style-type: none"> 균일성 Step coverage
第 2 世 代 (1980 頃)	<ul style="list-style-type: none"> 저 압 Hot wall $WCl_6 + H_2$ $WF_6 + H_2$ ($400^\circ C \sim 800^\circ C$) 		<ul style="list-style-type: none"> 국제전기 AMT 신 항 	<ul style="list-style-type: none"> 균일성 	<ul style="list-style-type: none"> 염화물 Source의 취급
第 3 世 代 (1984)	<ul style="list-style-type: none"> 저 압 Hot wall 종 형 $WF_6 + H_2$ 선택 W ($\sim 400^\circ C$) 		<ul style="list-style-type: none"> ANICON 	<ul style="list-style-type: none"> throughput 	<ul style="list-style-type: none"> W 산화 재현성
第 4 世 代 (1985)	<ul style="list-style-type: none"> 저 압 Cold wall Barrel $WF_6 + SiH_4 + H_2$ 선택 W Blanket W ($\sim 450^\circ C$) 		<ul style="list-style-type: none"> GENUS 	<ul style="list-style-type: none"> SiO_2 위에 전면형성 	<ul style="list-style-type: none"> adhesion 저반사율
第 5 世 代 (1987)	<ul style="list-style-type: none"> 저 압 Cold wall 매 옆 $WF_6 + H_2$ ($\sim 400^\circ C$) 		<ul style="list-style-type: none"> VARIAN SPECTRUM 	<ul style="list-style-type: none"> 재현성 선택성 	<ul style="list-style-type: none"> Throughpnt

제 3 장 CVD 박막제조장치 설계

제 1 절 과거경험

대면적 박막제조장치의 설계에 앞서서 과거경험에 관한 토의를 하고자 한다.

1. poly-silicon 증착용 반응기

본 연구실로서는 처음 설계제작된 CVD반응기는 poly-silicon 증착용이었는데 다음과 같은 특징을 가지고 있다(한국과학기술연구원 보고서(1988, 1989), 그림 3.1).

- 반응기재질 : quartz, 두께 6mm
- 반응기형태 : 사각형, 가스도입부는 dead space/recirculation zone을 없애기 위해서 경사가 완만한 expansion zone을 두었다.
- 가열방법 : 텅그스텐-할로젠 전구(1kw 14개)
- 반응기외벽은 냉각수 및 공기로 냉각
- 시편은 반응기 중간에 옆쪽으로 붙은 지지대에 의해 반응기 중앙에 floating되게 설치된 graphite로 이루어진 sample holder위에 놓이게 되어있다. Sample holder의 크기 : 2.5×4 cm, 두께는 3mm와 11mm의 두가지.
- 온도측정 및 제어 : sample-holder안에 K-type열전대를 삽입하

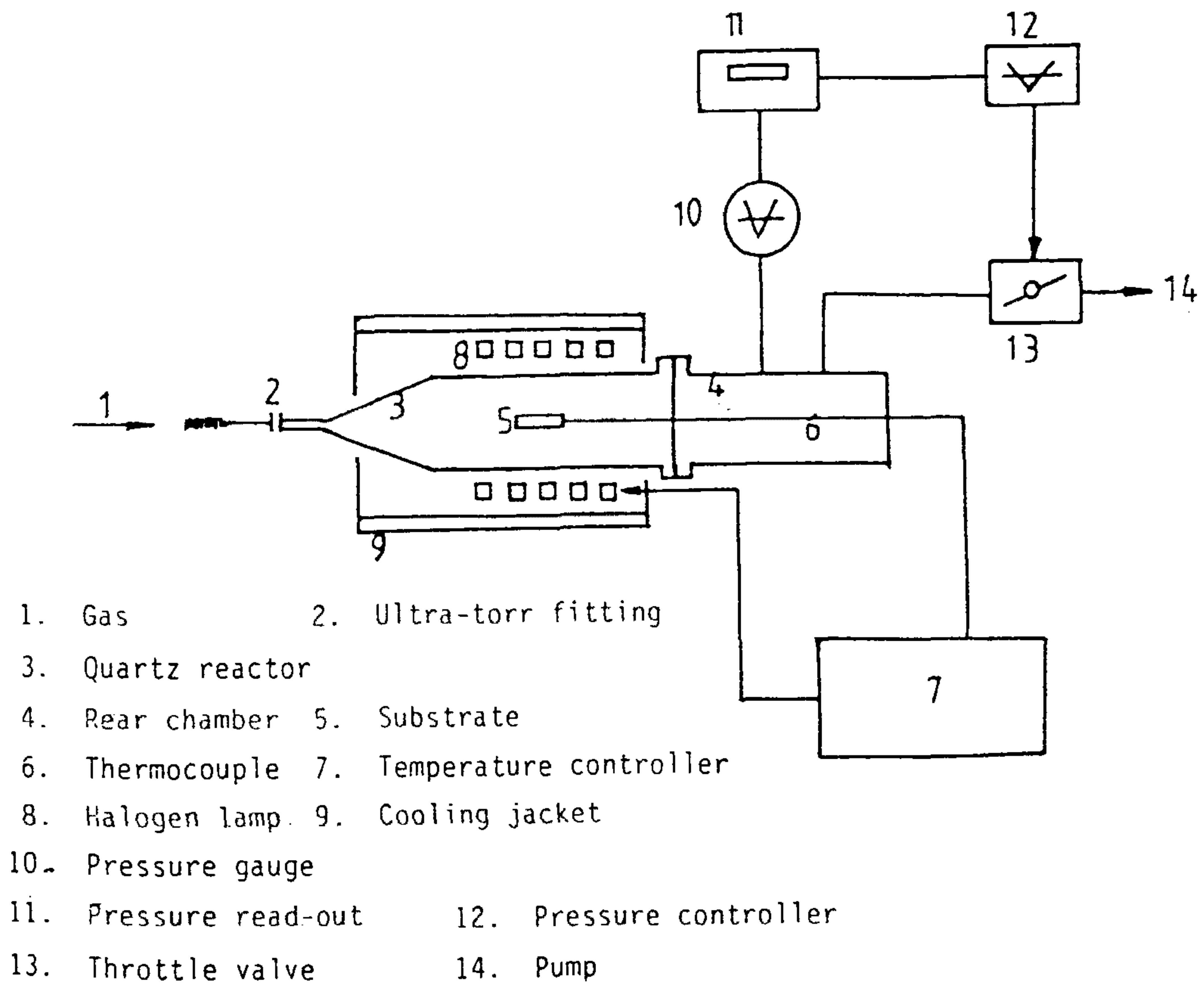


Figure 3. 1 Schematic Diagram of CVD Reactor System for Poly-silicon Deposition.

여 그 온도를 lamp-heating power supply와 연결, 반응기의 온도제어를 하게끔 되어있다.

- 반응기 압력제어 : MKS사의 Baratron Gauge 및 throttle valve 로 구성되었다.

- 진공펌프 : diffusion pump 및 rotary-vane pump로 구성되었다.

증착실험

실험조건

- 온도 : 600-650°C
- 압력 : 0.5-2torr
- 가스유량 : 0.62- 3.72 sccm SiH₄
- 시편 : 2×1.5cm, 3inch 〈111〉 single crystal silicon wafer를 절단하여 준비하였다.
- 실험진행순서는 그림 3.2에 나타나 있다.

실험결과의 고찰

- 문헌에 보고된 자료가 풍부한 poly-silicon증착실험을 통해 CVD반응기에 관한 기초 자료수집이 가능하였다.
- 실제 증착이 일어나는 시료표면의 온도를 정확히 측정하는데 어려움이 많았으며 시편의 크기가 비교적 작음에도 불구하고 온도편차가 무시할 수 있을 정도로 작지는 않았다. 그림 3.3에 온도편차의 한 예가 나타나 있는데 1cm정도의 수평거리에 약 10°C정도의 온도편차를 보여주고 있다. Lamp heating 시스템이 연구비 제약으로 인하여 정교하게 제작되지 못한데 그 원인이 있으나 lamp heating의 고유 특성으로 인하여 정확한 온도 측정 및 제어가 원천적으로 어렵다는 점도 무시할 수는 없다.

- Sample holder도 가열되는 관계로 그곳에도 poly-silicon이 증착되었으며, sample holder와 접촉하고 있는 시편의 뒷면도 앞면과 거의 마찬가지로 두께로 poly-silicon이 증착된 것이 관찰되었다.

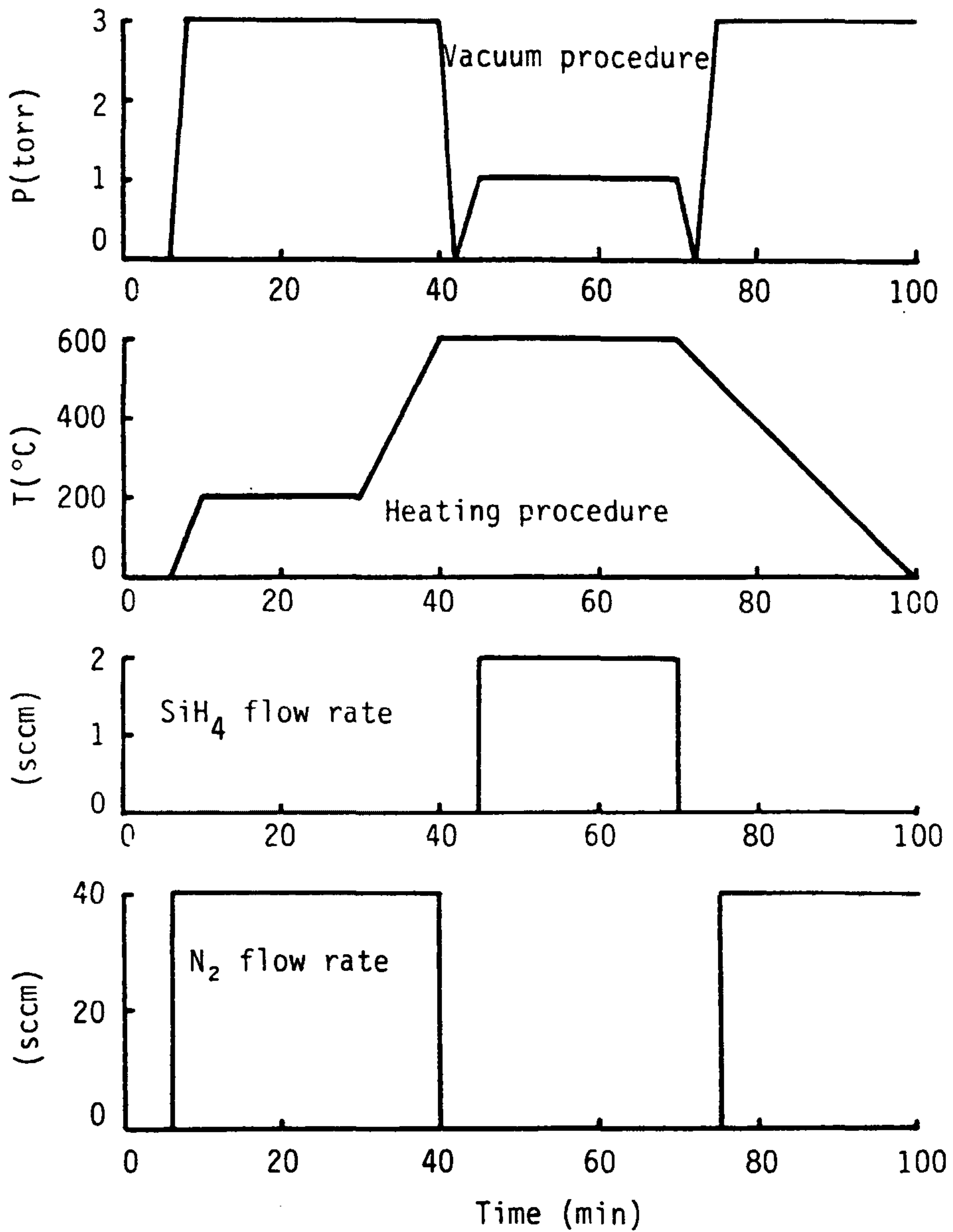
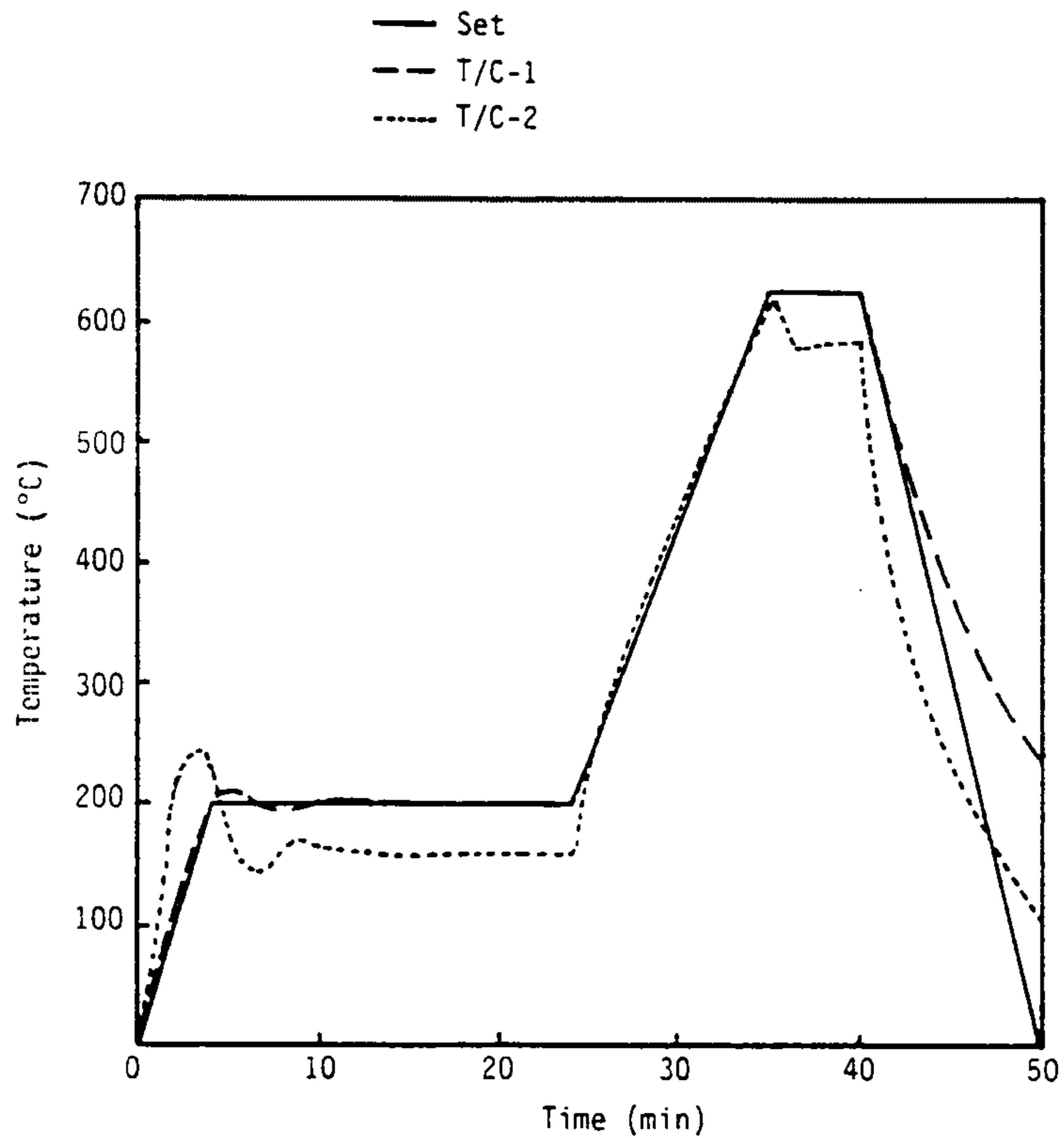
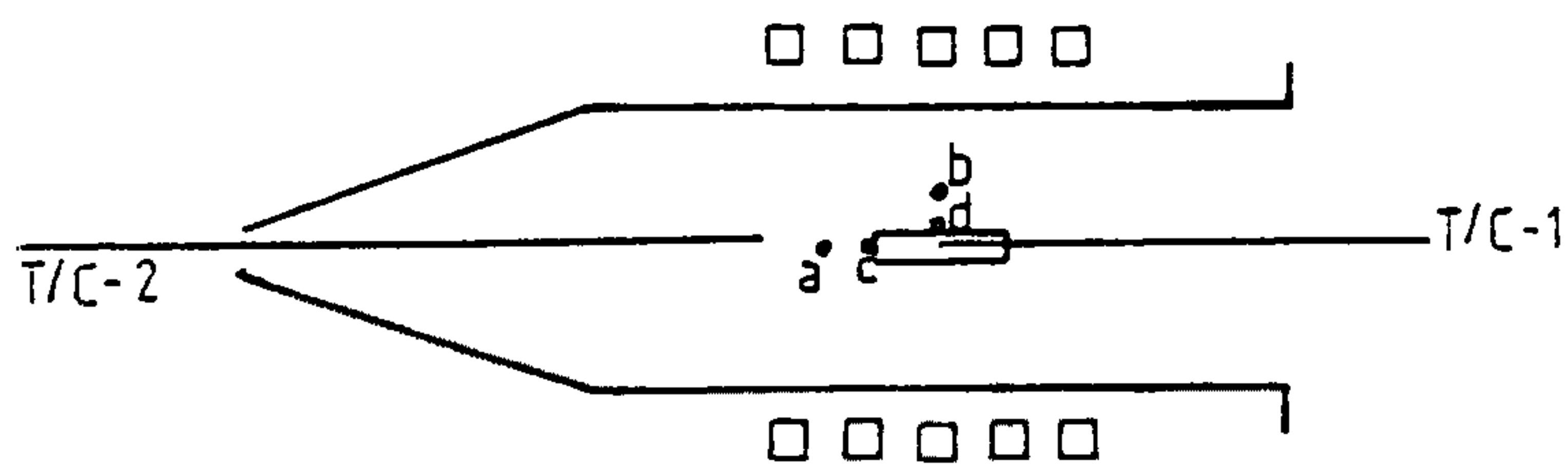


Figure 3. 2 Process Sequence Diagram for Poly-silicon Deposition.



(a)

Temperature variations measured at (a) position a, (b) position b, (c) position c, and (d) position d



Position of thermocouple for measuring temperatures around the susceptor

Figure 3. 3 Temperature Variation around Substrate in Poly-Silicon Deposition.

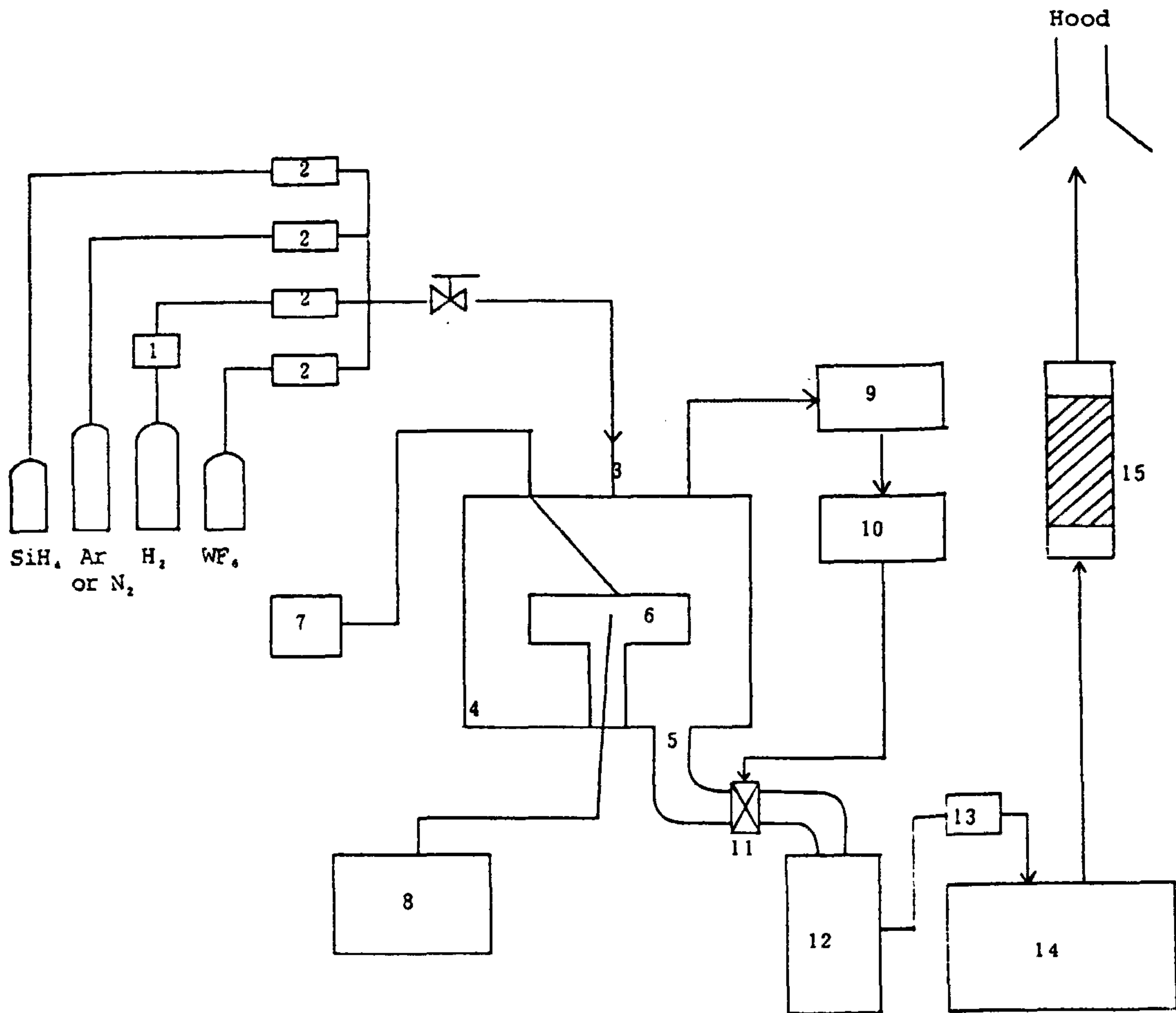
2. 텅그스텐 증착용 CVD 반응기

텅그스텐 증착용 반응기 4인치 wafer를 증착시킬 수 있는 single wafer반응기 형으로(그림 3.4) 그 제원은 아래와 같다(한국과학기술연구원보고서, 1989, 1990).

- 반응기 재질 : stainless steel 316
- 반응기 형태 : impinging jet type, 시편은 heating block 위에 놓여지게 되었다.
- 반응기 크기 : 280mm ID×220mm H
- 가열방법 : resistant heating, 500 watt용량.
- 온도 제어 : wafer 표면에 thermocouple을 접촉시켜 온도를 측정하여 heater와 control loop를 구성케 하였음.
- 압력제어 : 앞의 polysilicon증착 경우와 같았다.
- 진공펌프 : rotary vane pump 및 turbomolecular pump

실험범위

- 증착온도 : 300-500°C(wafer surface기준)
- 반응기압력 : 0.5-5torr
- 가스유량 : tungsten hexafluoride 1-10 sccm
hydrogen 100-200 sccm
silane 3-20 sccm
- 시편 : 4 inch n-type <111> silicon wafer
- 증착시간 : 30-60 minutes
- 실험진행방법 : hydrogen reduction경우와 silane reduction경우의



- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Hydrogen purifier | 8. Heater temperature controller |
| 2. Mass flow controller | 9. Pressure readout |
| 3. Gas to reactor | 10. Pressure controller |
| 4. Reactor | 11. Throttle valve |
| 5. To pump | 12. Turbomolecular pump |
| 6. Heater | 13. Alumina trap |
| 7. Surface temperature measurement | 14. Rotary pump |
| | 15. Gas scrubber |

Figure 3. 4 Schematic Diagram of CVD Reactor System for Tungsten Deposition.

두가지 실험을 수행하였는데 각각의 실험진행순서는 그림 3.5 과 그림 3.6에 나타나있다.

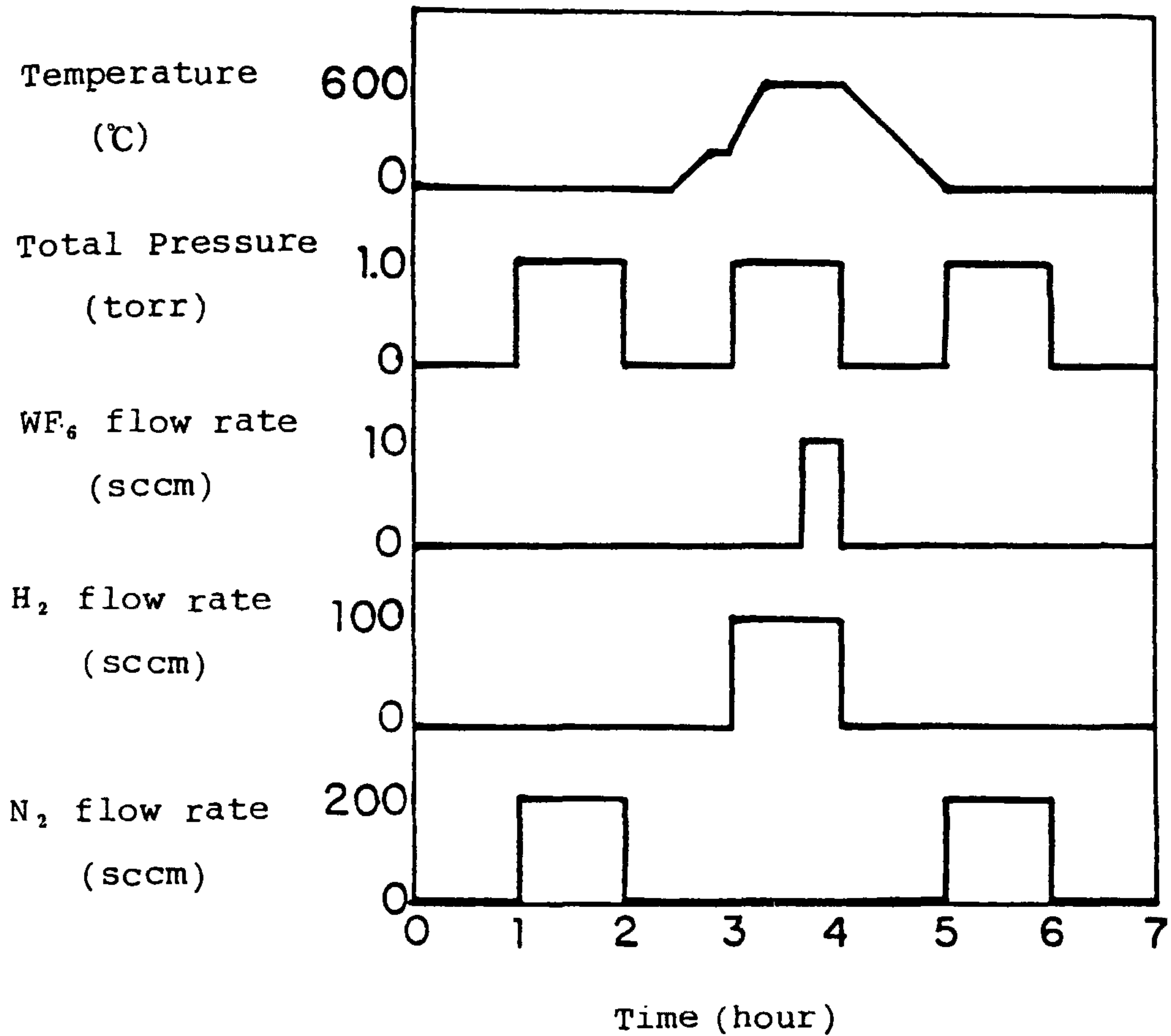


Figure 3. 5 Process Sequence Diagram for Tungsten Deposition : Hydrogen Reduction of Tungsten Hexafluoride.

실험결과의 고찰

- 텅그스텐의 증착속도를 비롯한 여러가지 특성이 문헌에 나타나 있는 것과 유사한 결과를 보여주었다.
- wafer표면에서 온도 편차가 존재하여 동일한 wafer위에서도

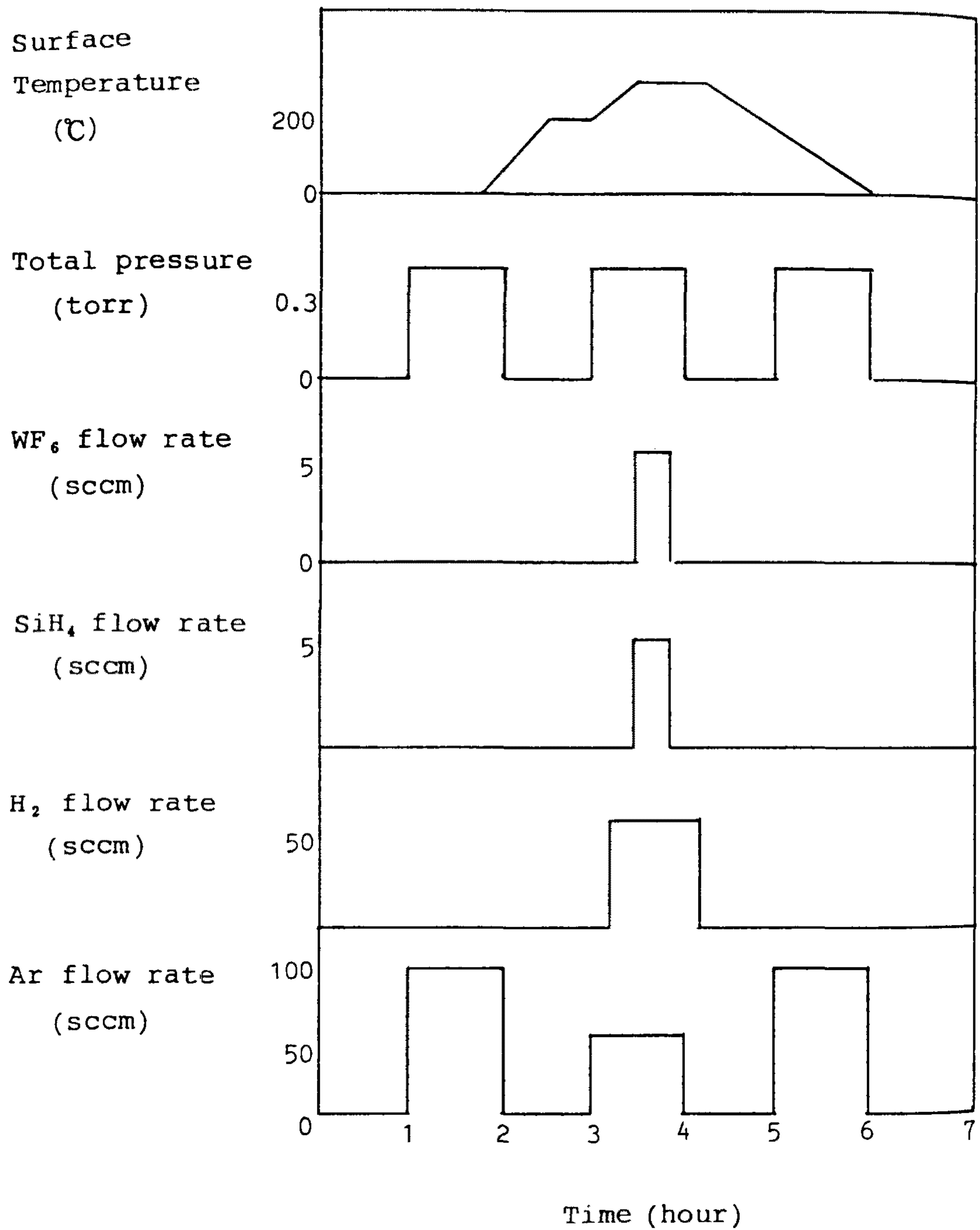


Figure 3. 6 Process Sequence Diagram for Tungsten Deposition :
Silane Reduction of Tungsten Hexafluoride.

증착된 텅스텐의 두께도 많은 차이를 나타내었다. 즉 wafer 중앙부분에서는 온도가 비교적 높고 균일한 관계로 증착속도 또한 빠르고 균일하지만, 가장자리 부분으로 갈수록 온도가 낮아져서 증착속도도 낮은 것이 관찰되었다(그림 3.7).

- wafer 뒷면에는 텅스텐의 증착이 거의 일어나지 않았다.

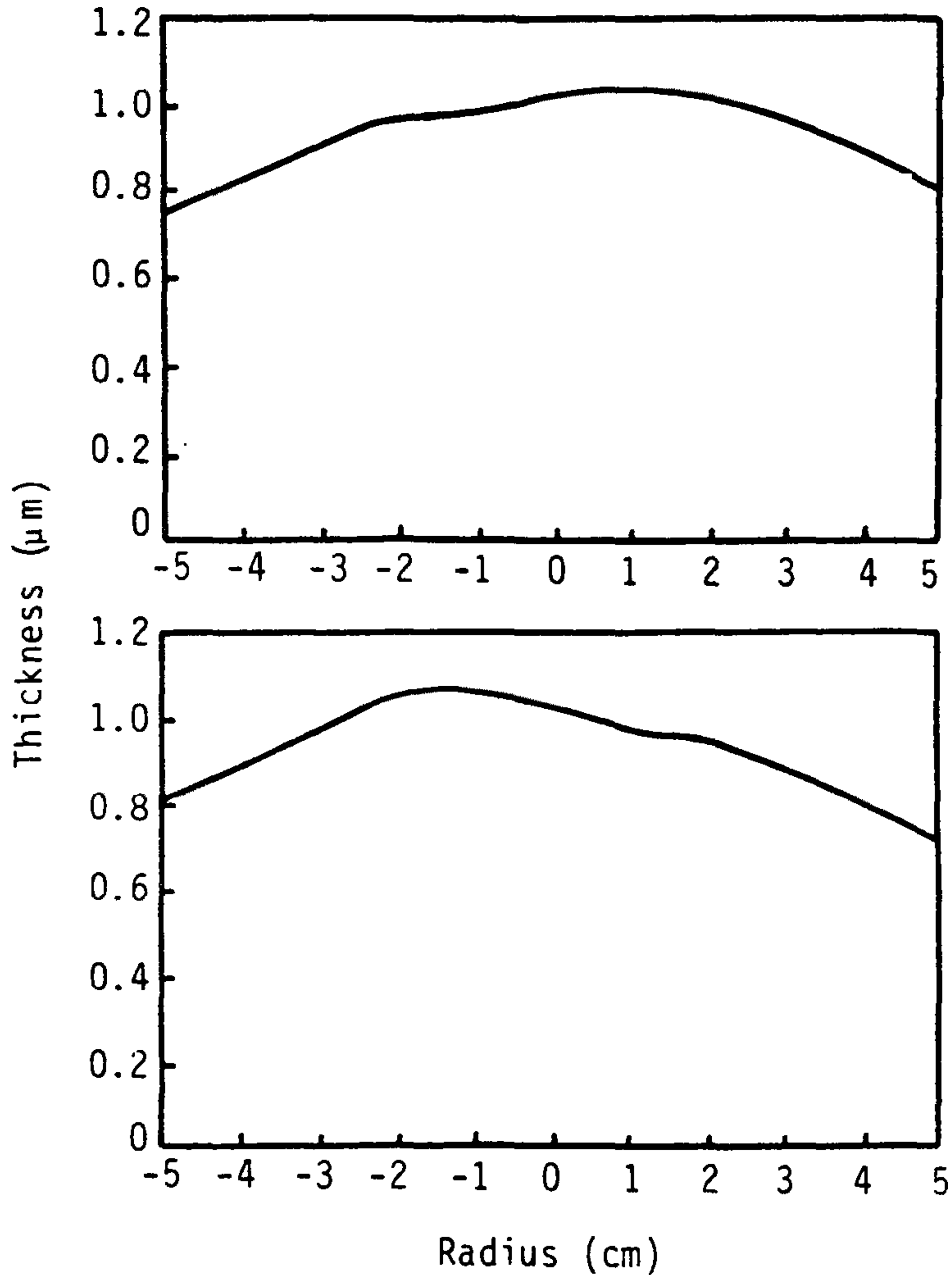


Figure 3. 7 Profile of Tungsten Film Thickness across Wafer.

3. 비정질실리콘 증착용 PECVD 반응기

비정질실리콘 증착용 PECVD 반응기도 역시 single wafer type으로 설계되었으며(그림 3.8) 그 제원은 아래와 같다(한국과학기술연구원보고서, 1990).

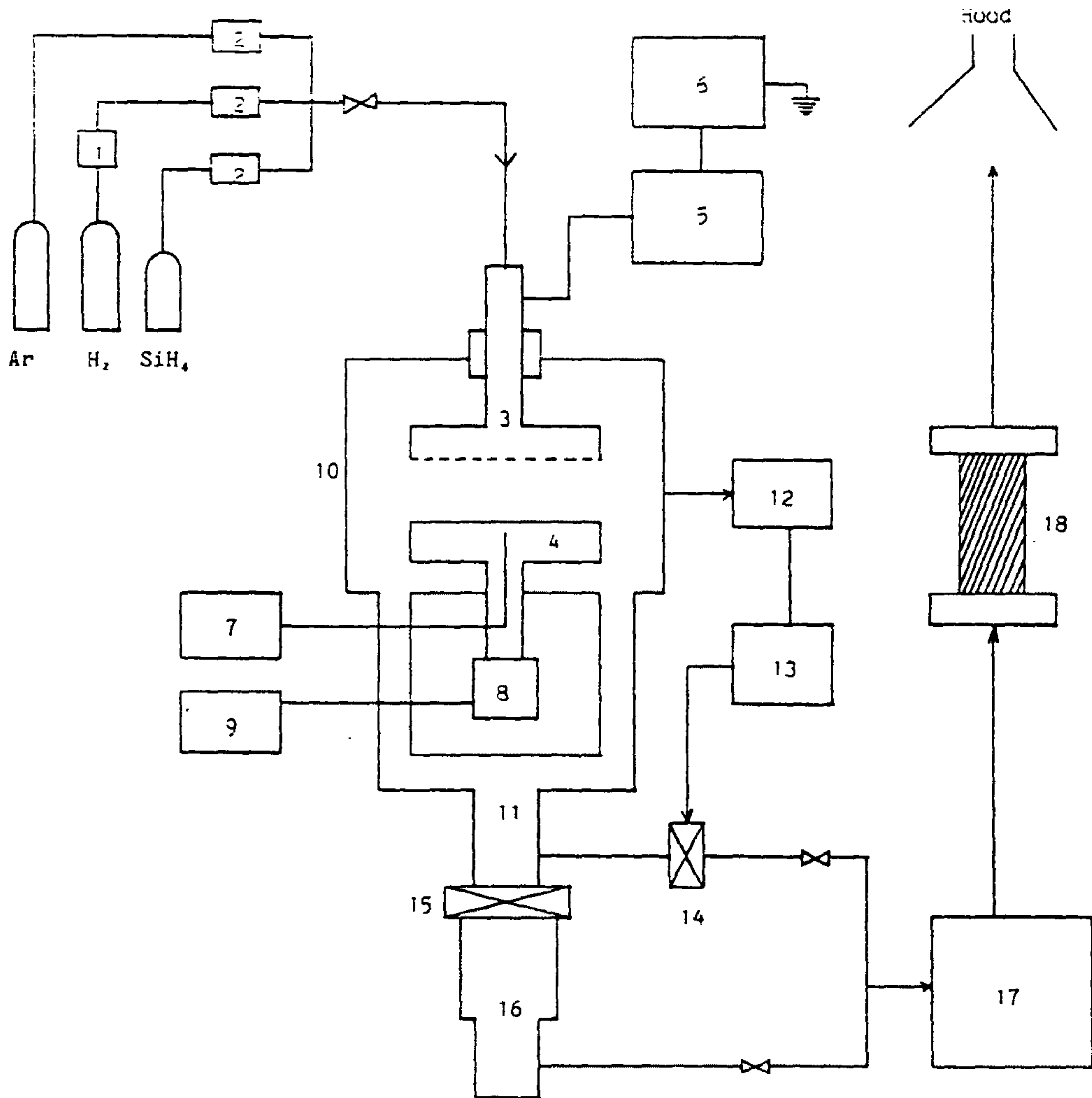
- 반응기 : stainless steel 304
- 반응기형태 : impinging jet type, 원통형, 5 inch wafer 처리가능
- RF Generator : 200 watt, 13.56MHz
- 온도제어 : resistant heating 및 cooling water
- 압력제어 : 텅그스텐증착용과 유사함
- 진공펌프 : rotary pump 및 diffusion pump

실험범위

- 압력 : 0.2-0.6 torr
- 가스유량 : silane 5 sccm
hydrogen 0-20 sccm
- RF power : 20-60 watts
- 시편 : slide glass, 25×75mm, thickness 1.0mm
- 실험진행방법은 그림 3.9에 나타나 있다.

실험결과의 고찰

- 충분한 양의 실험을 수행하지는 못하였으며, 증착속도의 최적화를 하지않은 관계로 비교적 낮은 증착속도를 나타내었다.



- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1. Hydrogen purifier | 10. Reactor |
| 2. Mass flow controller | 11. To pump |
| 3. Upper electrode | 12. Capacitance manometer |
| 4. Lower electrode | 13. Pressure controller |
| 5. Matching network | 14. Throttle valve |
| 6. R.F. generator | 15. Gate valve |
| 7. Temperature controller | 16. Diffusion pump |
| 8. Rotating shaft | 17. Rotary pump |
| 9. R.P.M. controller | 18. Gas scrubber |

Figure 3. 8 Schematic Diagram of PECVD Reactor System for Amorphous Silicon Deposition.

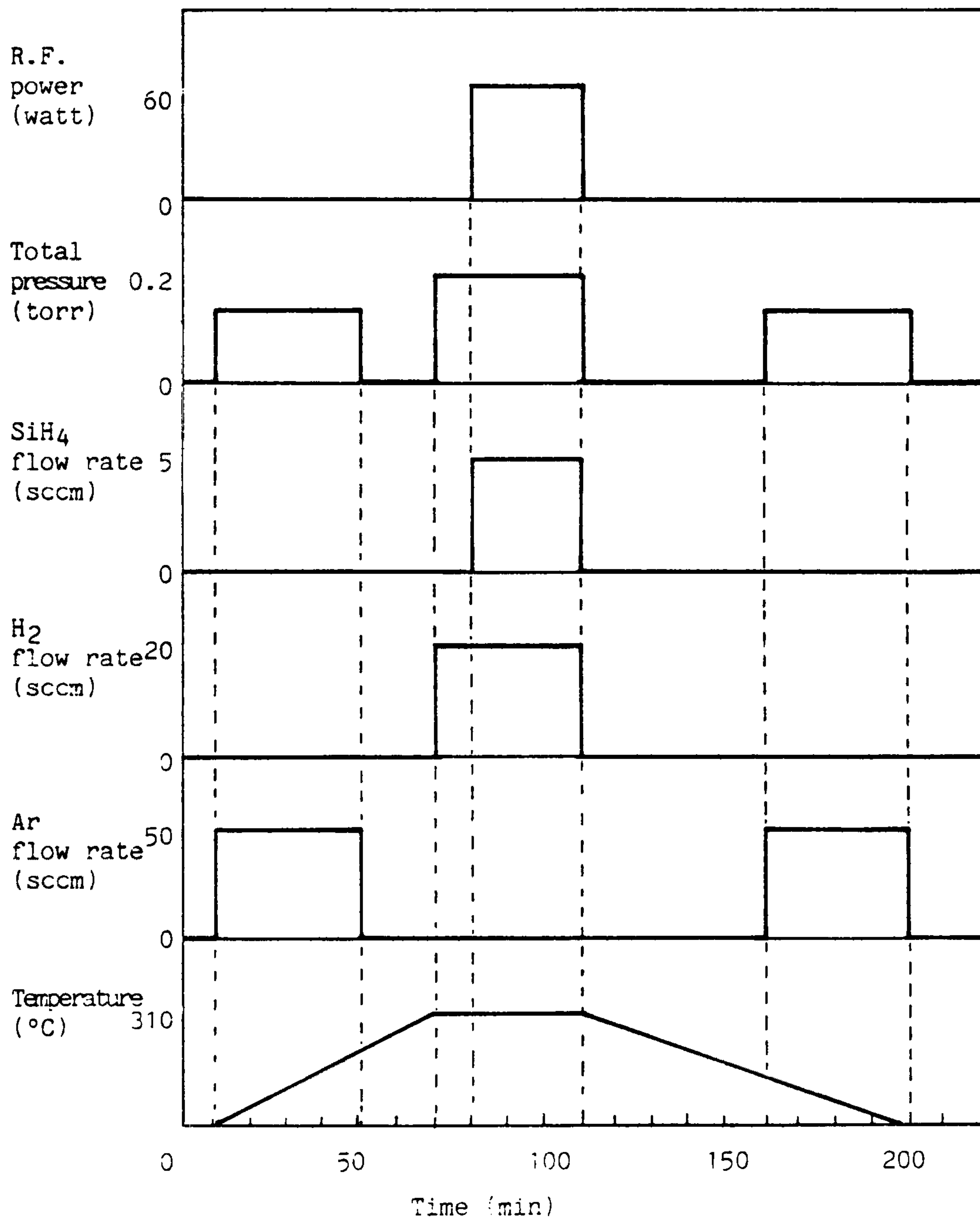


Figure 3. 9 Process Sequence Diagram for the Deposition of Amorphous Silicon from Silane.

제 2 절 공정설계

1. 반응기시스템

CVD반응기 시스템은 일반적으로 그림 3.10에서 보듯이 다음과 같은 여러 부분으로 구성되어 있다.

– 가스 공급시스템 : gas chamber, tubing, MFC

– 반응기 : vacuum chamber, internals

○ 가스도입부 : shower head/nozzel

○ 가열/온도제어장치 ;

가열방법 – resistant heating

lamp heating

induction heating

온도측정방법 – thermocouple

optical measurement

○ 압력제어 : pressure measurement

pressure control – throttle valve

○ 기판/시료의 취급 : load lock, robot arm

– 진공배기시스템 : vacuum pump

– 배가스 처리시스템 : absorption
incineration

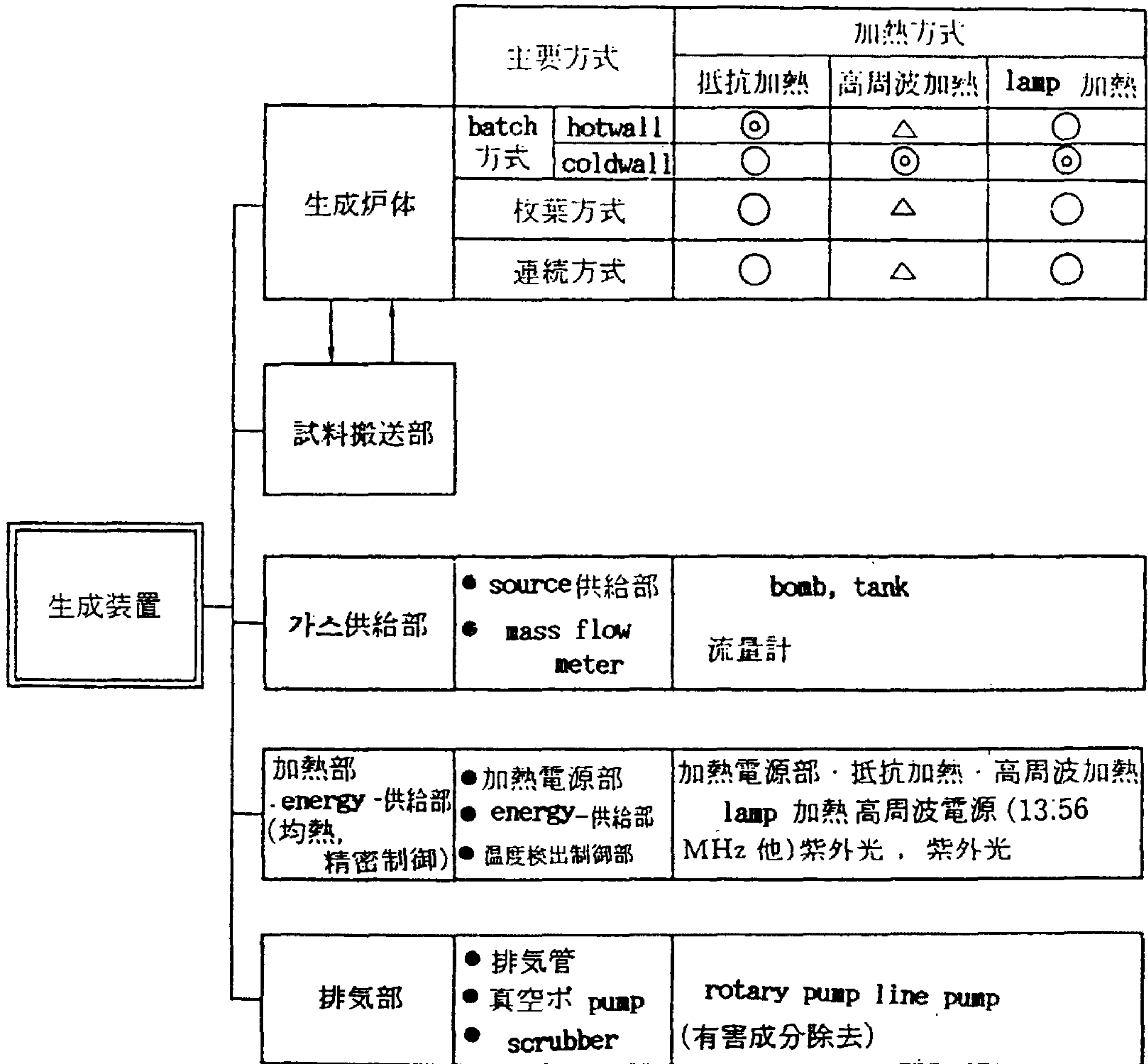


Figure 3.10 Components of CVD Reactor System.

2. 반응기 공정설계기준

과거의 경험을 바탕으로 대면적용 장치의 설계기준을 다음과 같이 정하였다.

설계기준

- 직경(또는 최대길이)25cm 기판 처리가능
- single wafer type reactor
- heating mode ; resisteant heating
- operating temperature of substrate ; 600°C
- cold wall reactor
- load lock
- LPCVD를 1차적 대상으로 하고 PECVD로서의 적용도 고려함.
- turbomolecular pump, -8 torr
- deposition material : SiO₂, Si₃N₄, ITO, a-Si, poly-si등의 증착을 고려함.
- Gas Flow Rate ; 600 sccm, total maximum

설계범위

설계증착장치는 기계부품 및 전기회로로 구성되어 있으므로 기계적인 상세도면과 전기회로 설계가 필요하며, 자동화를 위한 컴퓨터 자동제어시스템의 장착도 필요하다. 그런데 이러한 기계적·전기적 측면은 기본적으로 일반적인 증착시스템과 유사하고, 관련 전문 지식을 요하는데 진공펌프의 경우와 같이 vendor의 기술공급이

제품의 공급에 수반되는 수도 많다. 따라서 본 연구에서는 기본공정설계만 수행하였으며 vacuum chamber의 상세설계, substrate handling등과 같은 사항은 실시하지 않았다.

3. 공정설계

– Process Chamber

재질 : stainless steel

증착면적

$$\pi \cdot 0.25^2 / 4 = 0.0491 \text{ m}^2 = 491 \text{ cm}^2$$

직경 : 0.5meter

높이 : 0.3meter

Gas Nozzel/Showerhead : 0.25meter(직경)

Gap nozzel-substrate : adjustable 0.5cm-10cm

Internals : heating block

– Heater Capacity

3kw : Heating-up Time 15분

정상 운전온도 600°C기준

Cooling-down Time

– Gas Feed Rate

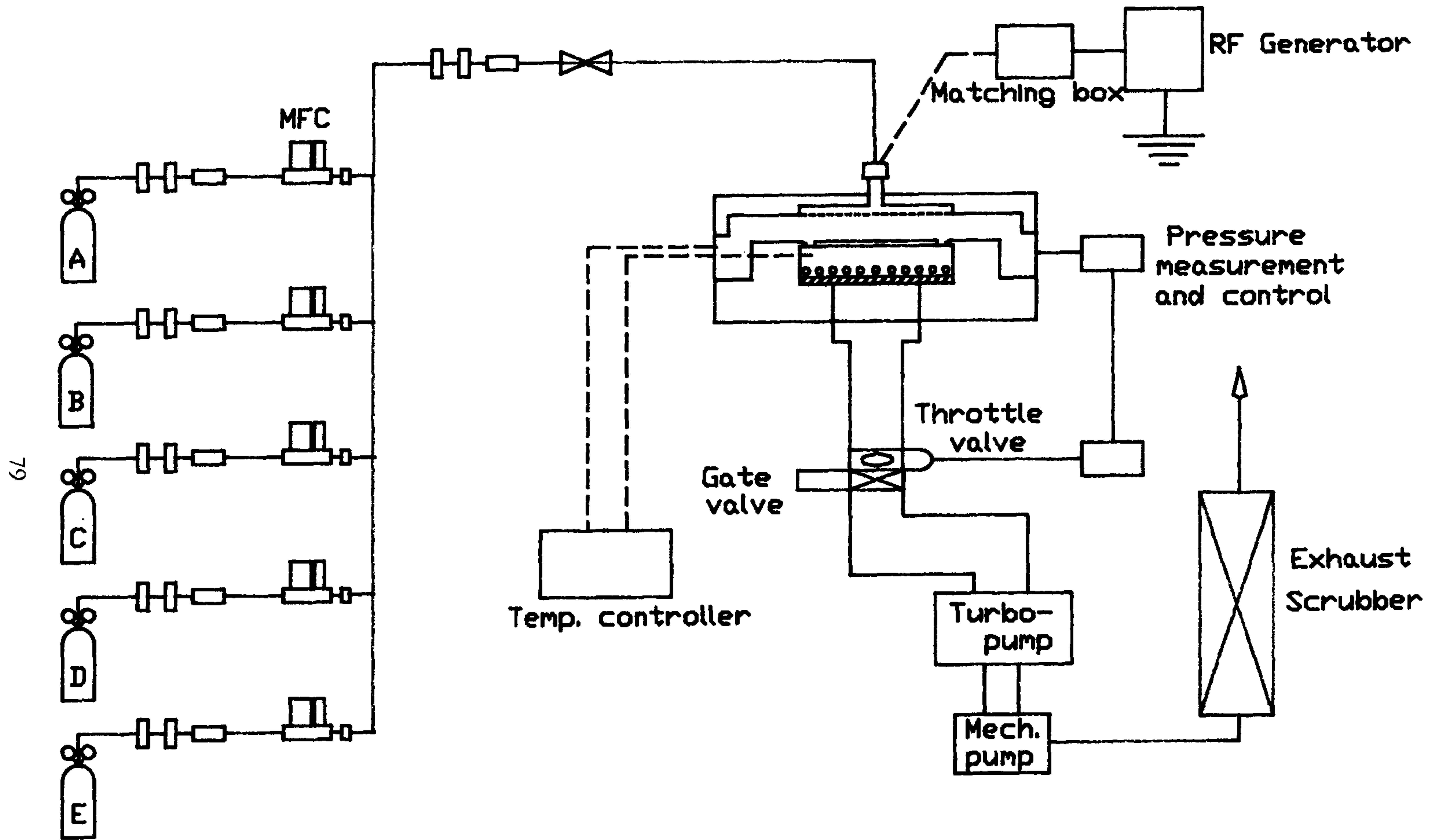


Figure 3.11 Schematic Diagram of Reactor System.

증착시 최대총가스유량 600 sccm

purge gas 용량 : 2리터/분

- Vacuum Pump

turbomolecular pump : Balzers TPH 2200, DUO 250A

- 기타 : RF Power-1.5kw

온도측정-TC 및 pyrometer

반응기 및 시스템의 개략도는 그림 3.11과 3.12에 각각 나타나 있으며 주요기기들의 목록은 표 3.1에 요약되어있다.

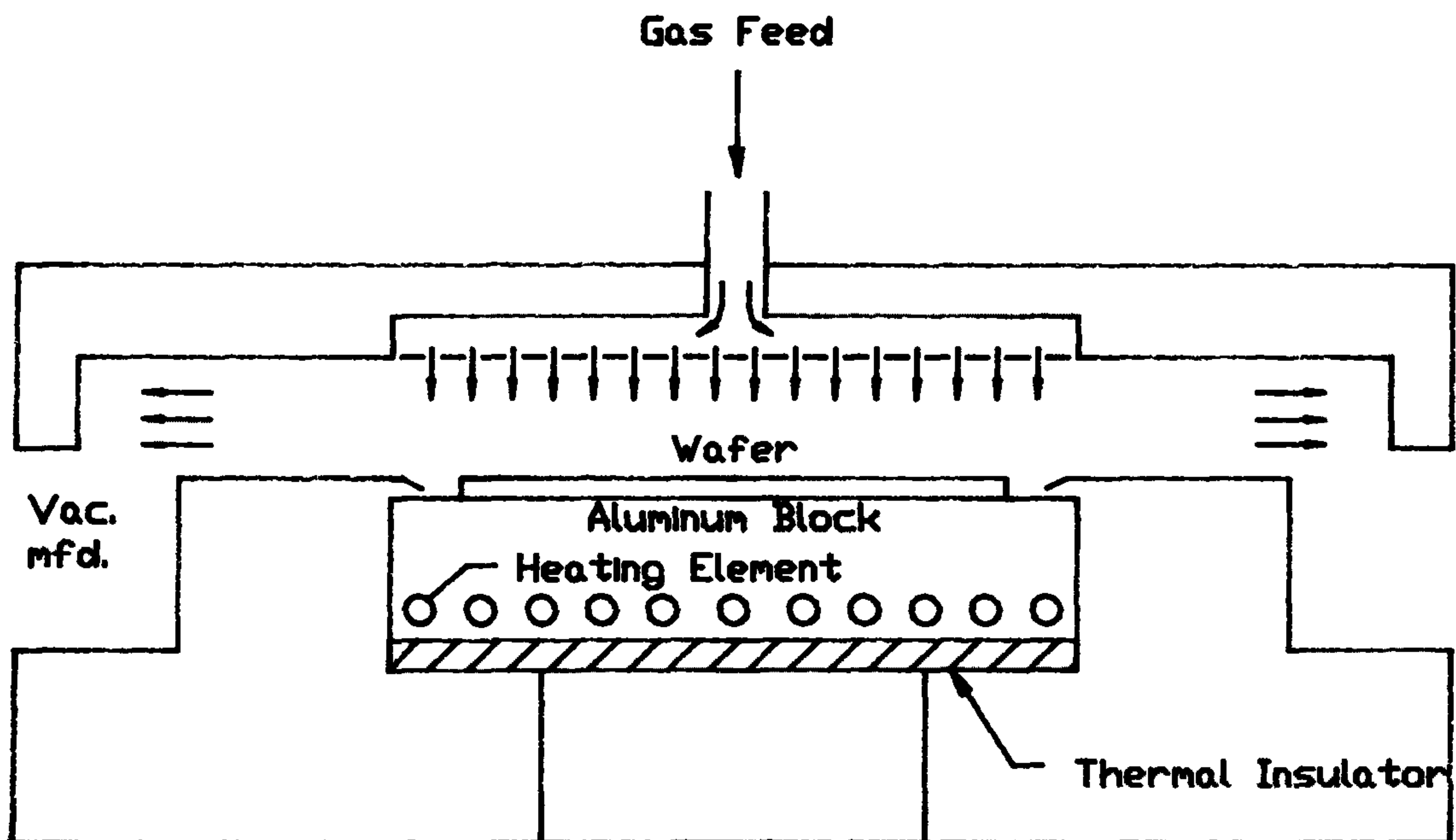


Figure 3.12 Schematic of Reactor.

Table 3. 1 List of Equipments.

equipment	specification	remarks
Mass Flow Controller	5ch	UNIT
Pressure gauges	Capacitance manometer 0.001—10.0 torr ionization gauge	MKS
Pressure read—out/controller	feed—back, PID.	MKS
Throttle valve	conductance	MKS
Temperature controller	K—type thermocouple PID control, programmable.	RKC/REX—P100
Vacuum Chamber	0.5m ϕ ×0.3mH. stainless steel 316 with flanges and internals.	
Vacuum Pumps	Turbomolecular Rotary—vane	Balzers Balzers
RF Generator with matching box	1.5kw 13.56MHZ	ENI
pyrometer	—1000°C	MIRCON 78

제 4 장 반응기해석 및 모사

제 1 절 과거의 경험

본 연구실에서는 두가지의 각각 다른 CVD반응기에 대한 수치모사를 수행한 경험이 있다. 첫번째는 한국전자통신연구소(ETRI)에서 제작한 반응기를 대상으로 하였고 두번째는 앞의 제3장에서 기술된 텅그스텐 증착용반응기가 대상이 되었었다. 두가지 경우 모두 single wafer, impinging jet/satgnation flow type reactor이며 텅그스텐 증착용반응기라는 공통점을 가지고 있으며 제2장에서 언급된 바 있는 PHOENICS를 사용해서 모사를 수행하였다.

ETRI반응기의 단면도는 그림 4.1에 나타나 있는데 아랫쪽으로부터 lamp heating을 하게되어 있는 특징을 가지고 있으며 shower head를 통해서 윗쪽으로부터 반응가스가 공급된다. shower head부위의 직경이 220mm이므로 wafer직경보다 크게 설계되어 있으며 shower head와 wafer사이의 간격은 30mm로서 wafer직경보다 훨씬 작은 특징을 가지고 있다. 따라서 반응기 내부의 가스가 흐르는 공간은 납작한 원통형에 가까우며 axisymmetry의 2차 원인, cylindrical coordinate로 approximation으로 해를 구하는 것이 가능하다. 그런데 2차원의 경우에도 해의 수렴에는 많은 계산시간(CPU time : Cyber기준으로 수 분)이 소요되는 관계로 가스의 흐름, 온도 분포, 가스농도분포를 구하는 한번의 계산에 약 5만원 내지 10만

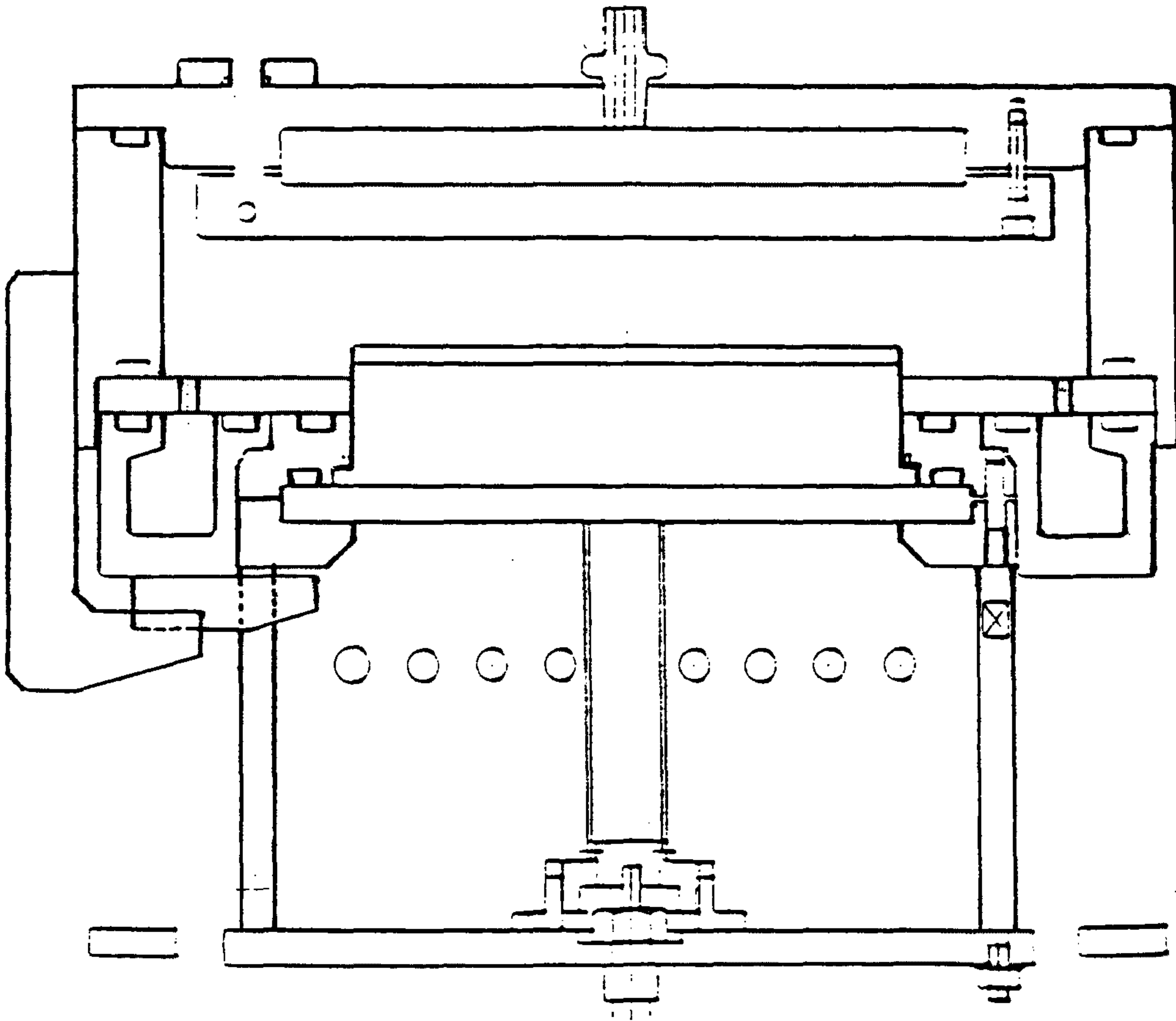
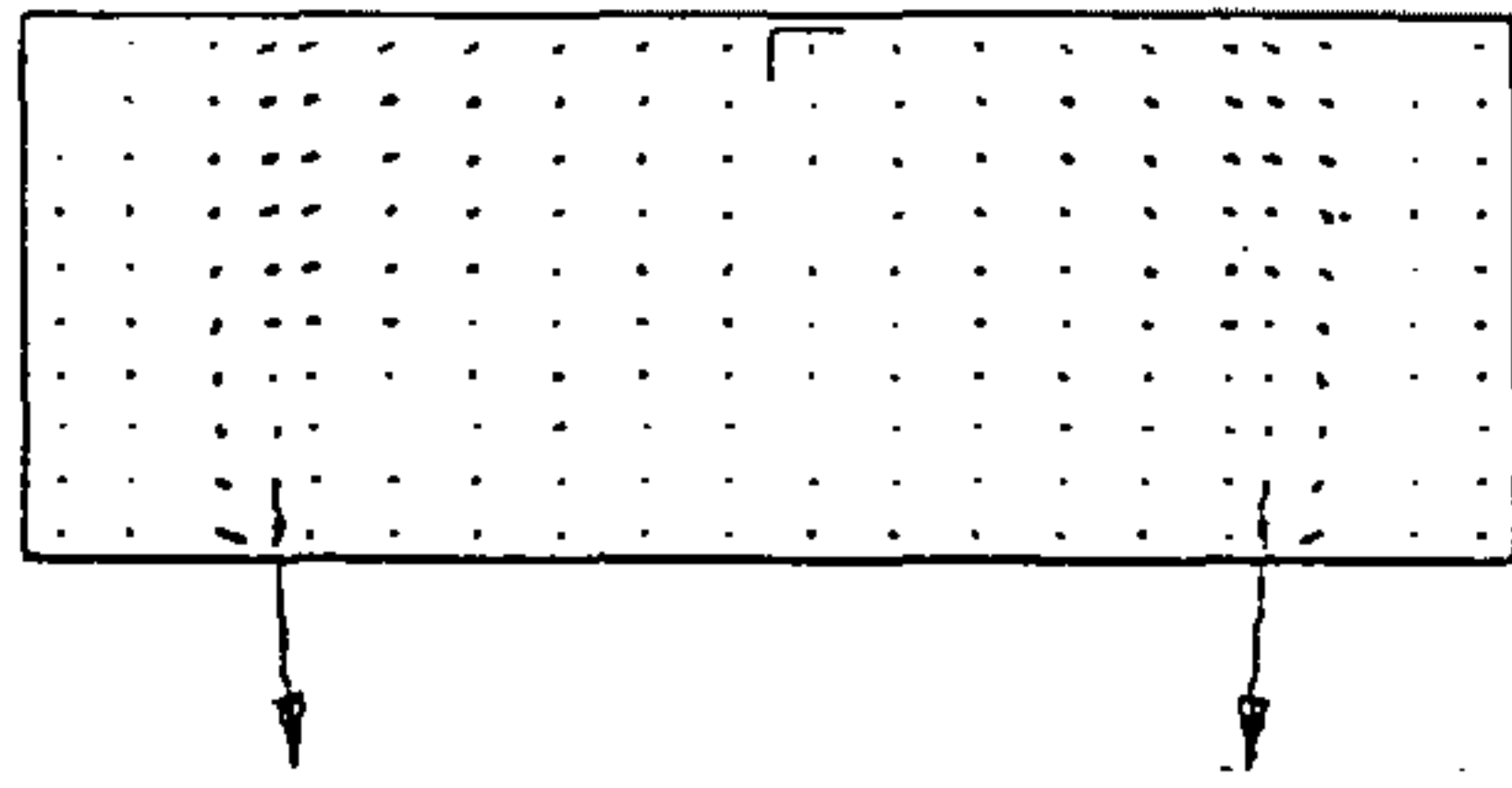


Figure 4. 1 Schematic Diagram of ETRI Single Wafer LPCVD Recator.

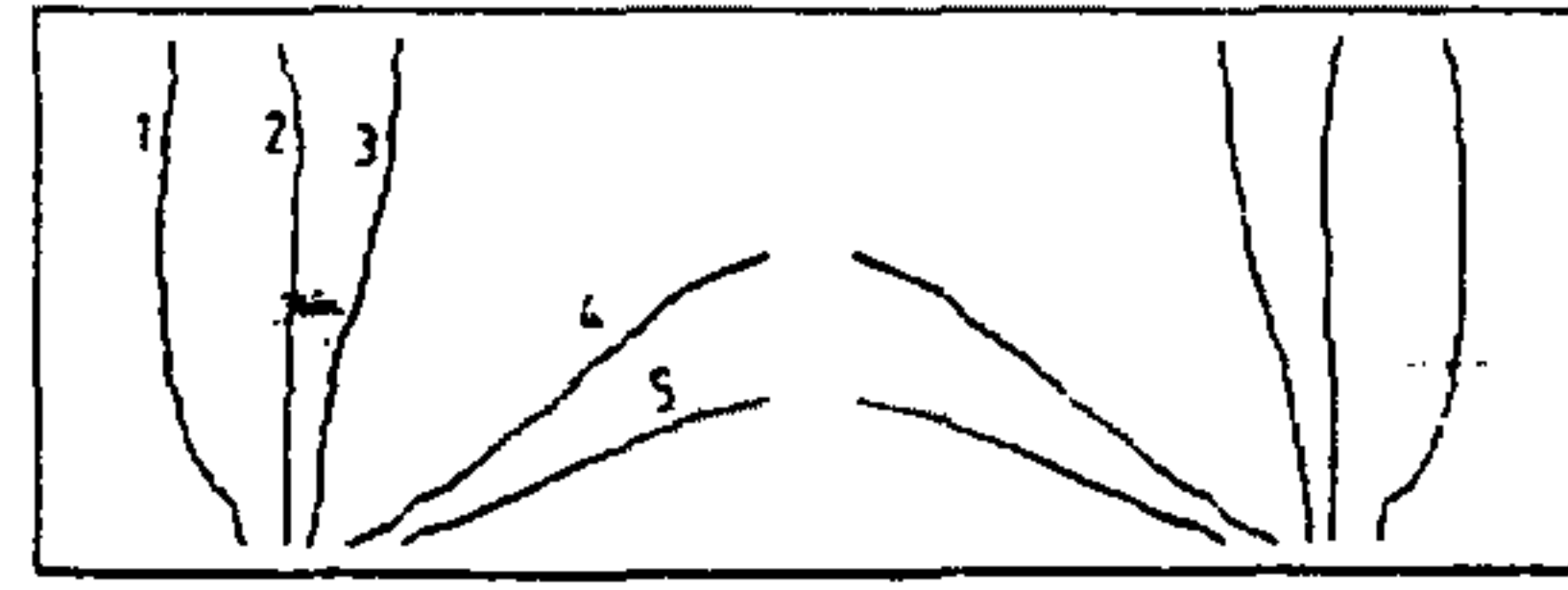
원 정도의 전산사용료가 소요되었다. PHOENICS가 설치되어 있는 한국과학기술연구원 부설 시스템공학연구소 전산시스템을 이용하였었다. ETRI반응기전산모사는 ETRI로 부터 반응기전산모사에 관한 위탁연구로서 수행되었었다. 계산결과의 한 예가 그림 4.2에 나타나 있다. 소요된 계산시간을 표 4.1에 수록되어 있는 문헌치와 비교할 때 비슷한 정도의 수치라고 할 수 있다. ETRI반응기가 완성되어

Table 4. 1 Comparison of CVD Model Computation.

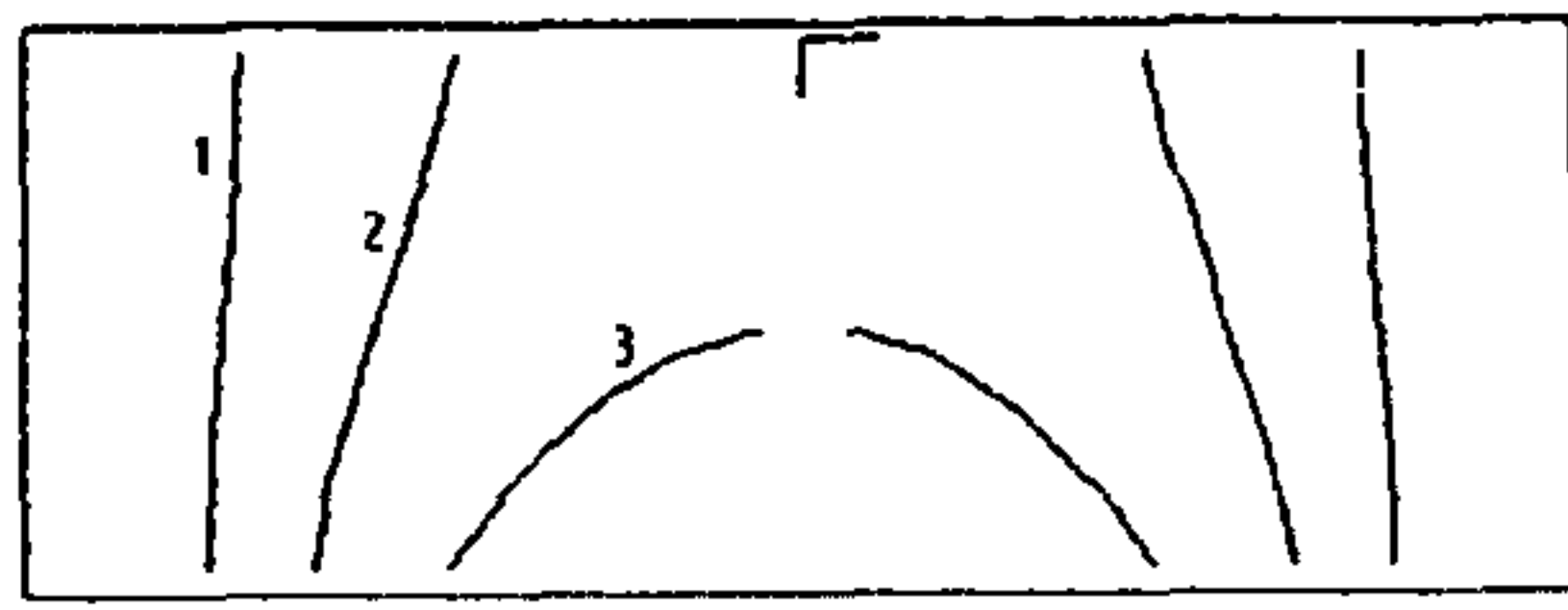
Reference	CVD System	Model	computer time	remark
Takahashi et al. (1972)	Horizontal, Si	Flow, Energy and deposition	HITAC 5020F 1-5min/run	Finite difference three dimensional
Juza and Cermak (1980)	Si Epitaxy	Flow, energy & Deposition	IBM-370 - 3min/run	Finite difference 2-D
Sherman (1985)	Stagnation, Si	Flow, energy, species.	VAX 11/750 temp. field - 1hr ; species conc. - 20 hr	Finite difference, axisymetry (2D).
Houtman et al. (1986)	Stagnation MOCVD	Flow, energy species	Cray-1 - 11 sec	finite element axisymetry (2D).
Moffat and Jensen (1986)	Horizontal MOCVD	Flow, energy species	Cray-1 200 CPU	finite element 3D



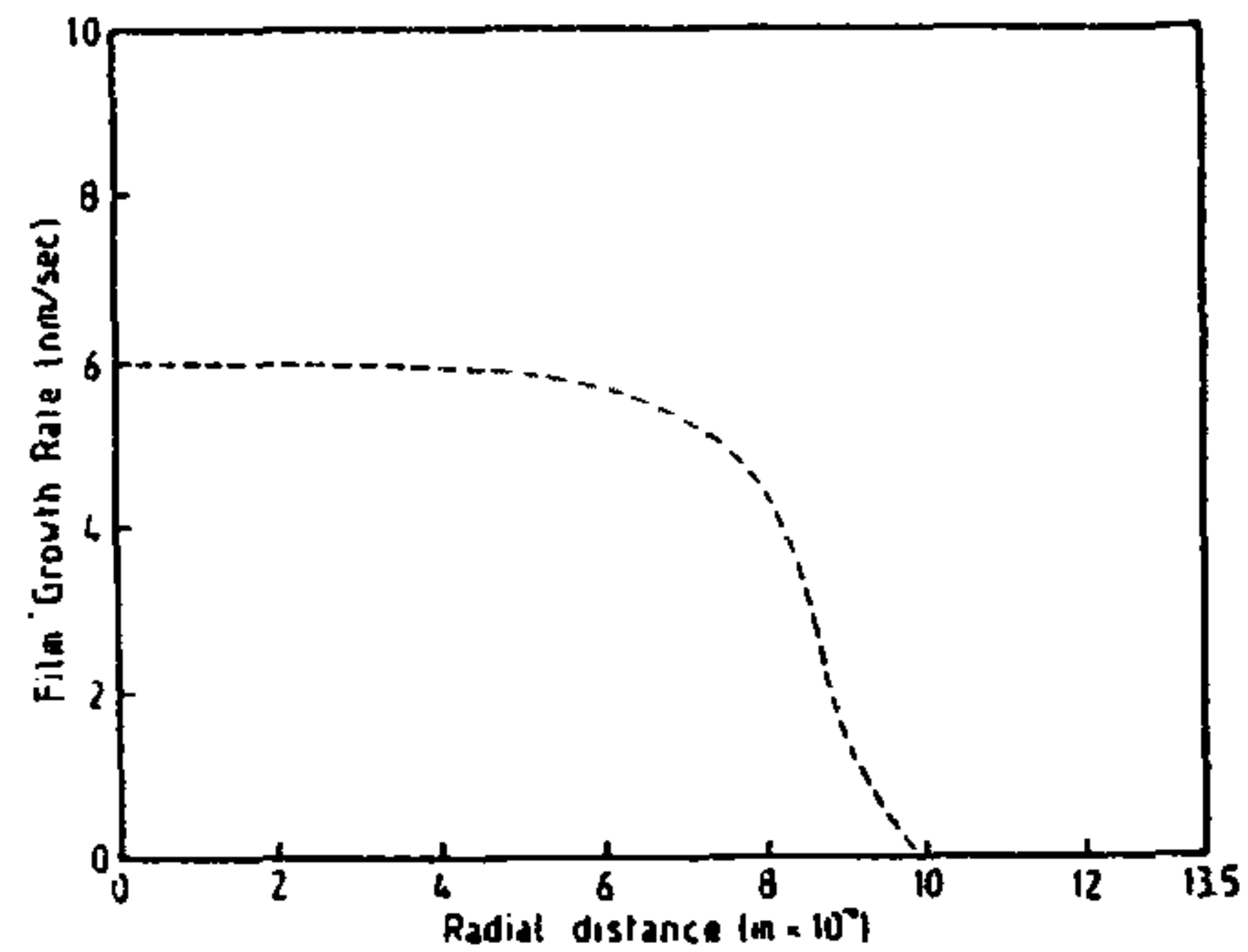
(a) ETRI 반응기내의 속도 벡터 분포도



(b) ETRI 반응기내의 온도분포곡선
(1:350°K, 2:550°K, 3:650°K, 4:750°K, 5:760°K)



(c) ETRI 반응기내의 WF₆ 무게분율 분포곡선
(1:0.8809, 2:0.8088 3:0.8807)



(d) ETRI 반응기내의 film 성장속도 분포도

Figure 4. 2 Typical Calculation Results for ETRI Reactor.

증착실험에 착수되기 이전에 전산모사위탁연구가 종료되었으며, ETRI에서 증착실험을 수행한 결과는 전달받지 못했던 관계로 전산모사와 실험치와의 비교는 수행할 수 없었다. 그 후 반응기자체도 타 용도로 해체, 전용된 아쉬움이 있었다.

제3장에서 언급된 텅그스텐증착용 반응기에 대한 모사도 역시 반응기를 axisymmetry의 cylindrical coordinate로 놓고 해를 구하였는데 wafer가 놓여져 있는 pedestal의 존재로 인하여 boundary condition이 조금 더 복잡한 양상을 보여준다. 따라서 PHOENICS

package 이용도 훨씬 더 까다로워서 해를 구하는 것이 용이한 일이 아니었다. 그림 4.3에 계산결과의 한 예가 나타나 있는데 impinging jet type의 반응기이므로 가스도입부의 가스속도가 빠른 것을 보여주고 있다. 역시 전산사용료가 많이 소요되었고, 연구비 및 연구기간의 제약으로 인하여 중착실험결과와의 충분한 비교검토가 여의치않았던 점이 유감이었다.

Ulacia F.등(1990)이 지적하였듯이 source code가 사용자에게 공개되지 않은 상태에서 적절한 subroutine들을 첨가하여 package를 사용하는 것은 단순한 작업이 아니며 많은 trial and error과정이 필요하였다. 따라서 전산비용 및 package사용료가 많이 소요되는 것은 물론이다.

FLUENT의 경우에도 package사용료가 들기 마련인데 Jasinski 와 Kang(1990)은 텅그스텐중착의 경우에 소요되는 비용을 표 4.2와 같이 보고하였는데 적지않은 금액임을 알 수 있다.

따라서 CVD중착모사에서 중요한 boundary condition의 자유로운 개조와 package사용료절감, 그리고 자체 simulation기본능력배양 및 장기적인 모델개선이 가능할 수 있도록 simulator source program을 개발하기로 하였으며 비용절감 및 사용의 편의를 위해서 personal computer를 사용하여 개발이 가능케 도모하였으며 본 연구기간에는 기본골격을 갖추는데 주안점을 두었다.

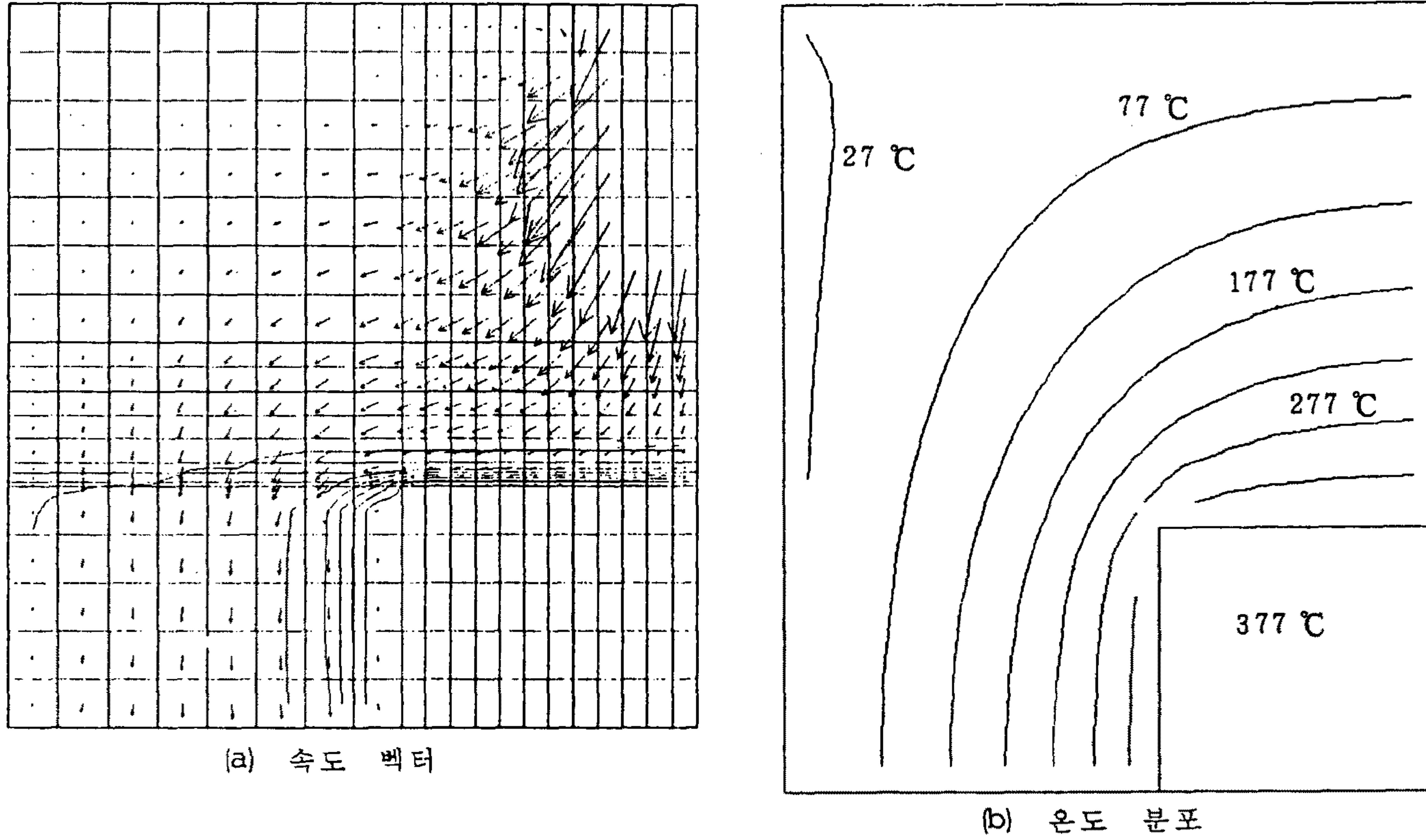


Figure 4. 3 Calculation Result for Tungsten CVD Reactor.

Table 4.2 Resources Required for Modeling with FLUENT.

"OVERHEAD"		PER SIMULATION		
RESOURCE	AMOUNT	STEP	AMOUNT	COMMENT
1. Computer Hardware	\$ 10,000 and up	1. Model Definition	8 hours	Gathering and defining geometry, physical models to be used and data for physical parameters.
2. CFD Software License	\$ 55,000 to 50,000 per year	2. Model Setup	60 mins	Type inputs to the computer
3. Training In Use of Software	2-8 weeks	3. Model Execution	60 mins 30 hours	CPU time for 2-D model with 750 grid points CPU time for 3-D model with 15000 grid points
		4. Evaluation	3 hours	Review output, verify appropriateness of model, interpret and understand results
		5. Subsequent Runs	2 hours	Modify input (e.g., boundary condition) and review results

제 2 절 Simulator Algorithm

사용하는 관점에서 볼 때, 반응기의 형태 및 화학반응의 종류에 구애받지않고 광범위하게 적용가능한 일반적인 simulator를 개발하는 것이 바람직하다. 시간과 노력을 절약하기 위하여, 널리 알려져 있고 또 많은 사람들에 의해서 code가 개발된 SIMPLE algorithm을 전산모사의 기초로 하였다.

SIMPLE은 Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation의 약자이며 SIMPLER(SIMPLE-Revised)의 version이 많이 이용된다(Patankar(1980)).

SIMPLE은 finite-volume method에 기초하는데 유체의 흐름, 열전달, 물질수지 등의 기본이 되는 아래의 diffusion식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + S_u - S_p\phi$$

를 discrete equation으로 전환시키는데 있어서, 이해를 돕기 위해 편의상 이차원의 경우에 그림 4.4에 도시된 바와 같은 control volume에 대하여 수행하는 것이 출발점이다. SIMPLE algorithm의 단계는 아래와 같다(Patankar(1980)).

1. Guess the pressure field.
2. Solve the momentum equations to obtain u^* , v^* .
3. Solve the ρ' equation.

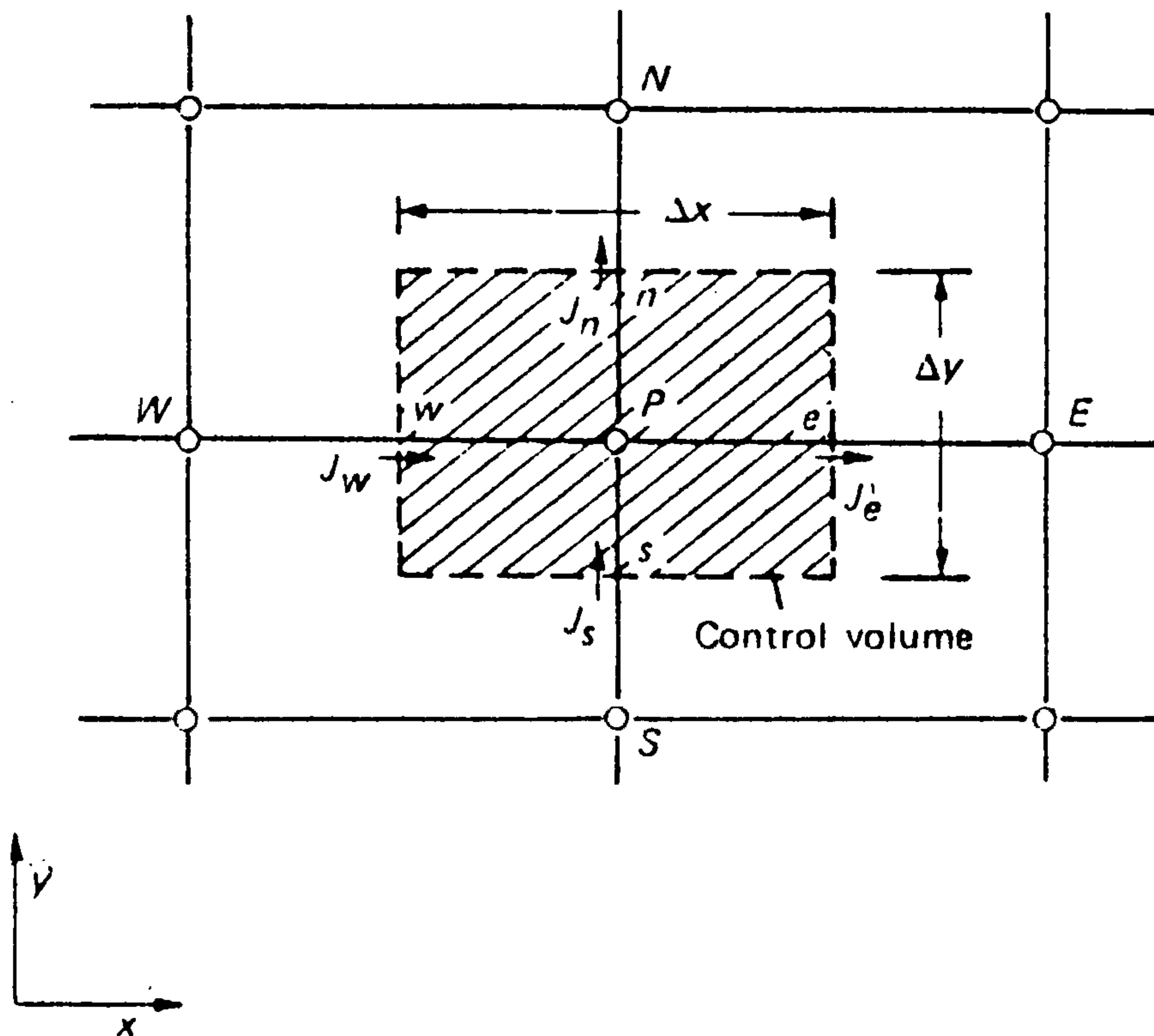


Figure 4. 4 Control Volume for Two Dimensional SIMLPE algorithm.

4. Calculate ρ by adding ρ' to ρ^* .
5. Calculate u , v from their starred values using the velocity-correction formulas.
6. Solve the discretization equation for other ϕ 's (such as temperature, concentration, and turbulence quantities) if they influence the flow field through fluid properties, source terms, etc. (If a particular ϕ does not influence the flow field, it is better to calculate it after a converged solution for the flow field has been obtained.)

7. Treat the corrected pressure ρ as a new guessed pressure ρ^* , return to step 2, and repeat the whole procedure until a converged solution is obtained.

SIMPLER는 위의 algorithm을 다음과 같이 개선한 것이다.

1. Start with a guessed velocity field.
2. Calculate the coefficients for the momentum equations and hence calculate \hat{u} , \hat{v} , from equations by substituting the values of the neighbor velocities u_{nb} .
3. Calculate the coefficients for the pressure equation and solve it to obtain the pressure field.
4. Treating this pressure field as ρ^* , solve the momentum equations to obtain u^* , v^* .
5. Calculate the mass source and hence solve the ρ' equation.
6. Correct the velocity field, but *do not* correct the pressure.
7. Solve the discretization equations for other ϕ 's if necessary.
8. Return to step 2 and repeat until convergence.

제 3 절 계 산 결 과

모사대상반응기는 제3장에서 설계된 시스템으로 하였다. 그리고 증착반응은 잘 알려진 실리콘증착을 대상으로 하였다. Personal computer를 이용하여 FORTRAN programming을 할때에 일반적으로

많이 쓰이는 Microsoft DOS 분위기 상의 큰 제약의 하나는 사용할 수 있는 array size에 있다.

이는 바로 모델에 사용 가능한 mesh size와 직결된다. 그러므로 personal computer를 사용할 경우에 비교적 mesh number를 작게 할수 밖에 없다. 그러나 simulator의 기본틀을 개발하는 데에는 큰 문제가 없는 것으로 사료된다. 본 연구에서는 mesh수를 25×25를 기본으로 하였다.

그림 4.5에는 전형적인 모델계산결과가 예시되어있다. 계산결과를 보다 이해하기 위해 도시화하면 그림 4.6에 나타나 있는 것과 같은 그림을 얻을 수 있다.

문제점, 개선해야 할 점들

본 연구에서 개발된 모델이 앞에서 본 바와같이 증착반응기를 잘 묘사하고 있으나 지니고 있는 문제점 및 개선을 필요로 하는 부분들도 여럿 가지고 있다.

Figure 4. 5 An Example of Output from Model Calculation.

J	Y(J)	DRATE(J)	GAM(L3,J)	CSH(L2,J)	CSH(L1,J)	T(L2,J)
1	.000	.1826D+03	.2316D-06	.5919D+00	.5854D+00	.8280D+03
2	.004	.1826D+03	.2313D-06	.5919D+00	.5853D+00	.8280D+03
3	.013	.1826D+03	.2312D-06	.5917D+00	.5851D+00	.8280D+03
4	.022	.1826D+03	.2310D-06	.5913D+00	.5847D+00	.8281D+03
5	.030	.1826D+03	.2308D-06	.5909D+00	.5843D+00	.8281D+03
6	.039	.1826D+03	.2307D-06	.5906D+00	.5840D+00	.8281D+03
7	.048	.1826D+03	.2306D-06	.5904D+00	.5838D+00	.8281D+03
8	.057	.1826D+03	.2306D-06	.5903D+00	.5837D+00	.8281D+03
9	.065	.1826D+03	.2306D-06	.5902D+00	.5836D+00	.8281D+03
10	.074	.1826D+03	.2305D-06	.5902D+00	.5836D+00	.8281D+03
11	.083	.1826D+03	.2305D-06	.5902D+00	.5836D+00	.8281D+03
12	.091	.1826D+03	.2305D-06	.5902D+00	.5836D+00	.8281D+03
13	.100	.1826D+03	.2305D-06	.5902D+00	.5836D+00	.8281D+03
14	.109	.1826D+03	.2305D-06	.5902D+00	.5836D+00	.8280D+03
15	.117	.1826D+03	.2305D-06	.5902D+00	.5836D+00	.8277D+03
16	.126	.1826D+03	.2301D-06	.5905D+00	.5839D+00	.8251D+03
17	.135	.1826D+03	.2268D-06	.5934D+00	.5867D+00	.8011D+03
18	.143	.0000D+00	.1284D-06	.6307D+00	.6307D+00	.3234D+03
19	.152	.0000D+00	.1241D-06	.6419D+00	.6419D+00	.3007D+03
20	.161	.0000D+00	.1241D-06	.6448D+00	.6448D+00	.2985D+03
21	.170	.0000D+00	.1242D-06	.6454D+00	.6454D+00	.2982D+03
22	.178	.0000D+00	.1242D-06	.6456D+00	.6456D+00	.2982D+03
23	.187	.0000D+00	.1242D-06	.6456D+00	.6456D+00	.2982D+03
24	.196	.0000D+00	.1242D-06	.6456D+00	.6456D+00	.2982D+03
25	.200	.0000D+00	.0000D+00	.6456D+00	.6456D+00	.2982D+03

WTSH,WCOND,OWSH,WSHO,ALPHAX
.2464E-07 .2749E+00 .2464E-07 .3142E-07 .9565E+00

		----- U (m/s) -----							
I =		2	3	4	5	6	7	8	
J									
25		0.00D+00	7.50D-05	1.56D-04	2.19D-04	2.68D-04	2.97D-04	3.05D-04	
24		0.00D+00	7.50D-05	1.56D-04	2.19D-04	2.68D-04	2.97D-04	3.05D-04	
23		0.00D+00	5.28D-04	1.16D-03	1.71D-03	2.17D-03	2.53D-03	2.78D-03	
22		0.00D+00	1.17D-03	2.58D-03	3.88D-03	4.94D-03	5.72D-03	6.20D-03	
21		0.00D+00	2.60D-03	6.08D-03	9.18D-03	1.15D-02	1.29D-02	1.35D-02	
20		0.00D+00	-6.95D-03	7.96D-03	1.71D-02	2.21D-02	2.43D-02	2.46D-02	
19		4.51D-02	3.63D-02	3.86D-02	3.94D-02	3.88D-02	3.71D-02	3.44D-02	
18		4.51D-02	4.46D-02	4.35D-02	4.22D-02	4.02D-02	3.77D-02	3.45D-02	
17		4.51D-02	4.47D-02	4.36D-02	4.20D-02	3.98D-02	3.71D-02	3.40D-02	
16		4.51D-02	4.48D-02	4.37D-02	4.21D-02	3.99D-02	3.73D-02	3.44D-02	
15		4.51D-02	4.48D-02	4.38D-02	4.22D-02	4.02D-02	3.78D-02	3.51D-02	
14		4.51D-02	4.48D-02	4.37D-02	4.22D-02	4.02D-02	3.79D-02	3.53D-02	
13		4.51D-02	4.47D-02	4.35D-02	4.19D-02	4.00D-02	3.77D-02	3.51D-02	
12		4.51D-02	4.45D-02	4.30D-02	4.13D-02	3.92D-02	3.69D-02	3.44D-02	
11		4.51D-02	4.41D-02	4.21D-02	4.00D-02	3.77D-02	3.53D-02	3.27D-02	
10		4.51D-02	4.33D-02	4.01D-02	3.74D-02	3.47D-02	3.21D-02	2.96D-02	
9		4.51D-02	4.17D-02	3.62D-02	3.23D-02	2.90D-02	2.61D-02	2.37D-02	
8		4.51D-02	3.89D-02	2.90D-02	2.30D-02	1.85D-02	1.53D-02	1.32D-02	
7		4.51D-02	3.42D-02	1.65D-02	7.03D-03	6.09D-04	-2.98D-03	-4.37D-03	
6		4.51D-02	2.78D-02	-2.97D-03	-1.74D-02	-2.65D-02	-3.06D-02	-3.08D-02	
5		4.51D-02	2.26D-02	-2.84D-02	-4.80D-02	-6.06D-02	-6.54D-02	-6.42D-02	
4		4.51D-02	2.89D-02	-5.33D-02	-7.51D-02	-9.17D-02	-9.84D-02	-9.68D-02	
3		4.51D-02	6.57D-02	-7.72D-02	-9.28D-02	-1.14D-01	-1.25D-01	-1.25D-01	
2		4.51D-02	-1.20D-02	-1.10D-01	-1.54D-01	-1.80D-01	-1.87D-01	-1.80D-01	
1		4.51D-02	-1.20D-02	-1.10D-01	-1.54D-01	-1.80D-01	-1.87D-01	-1.80D-01	
	I =	9	10	11	12	13	14	15	
J									
25		2.98D-04	2.79D-04	2.52D-04	2.19D-04	1.83D-04	1.42D-04	9.83D-05	
24		2.98D-04	2.79D-04	2.52D-04	2.19D-04	1.83D-04	1.42D-04	9.83D-05	
23		2.93D-03	2.98D-03	2.95D-03	2.84D-03	2.68D-03	2.48D-03	2.26D-03	
22		6.41D-03	6.38D-03	6.17D-03	5.80D-03	5.34D-03	4.82D-03	4.27D-03	
21		1.35D-02	1.30D-02	1.21D-02	1.09D-02	9.66D-03	8.34D-03	7.03D-03	
20		2.35D-02	2.16D-02	1.93D-02	1.66D-02	1.39D-02	1.12D-02	8.70D-03	
19		3.11D-02	2.73D-02	2.33D-02	1.91D-02	1.49D-02	1.09D-02	6.98D-03	
18		3.09D-02	2.68D-02	2.25D-02	1.79D-02	1.32D-02	8.52D-03	3.89D-03	
17		3.05D-02	2.68D-02	2.28D-02	1.88D-02	1.48D-02	1.09D-02	7.27D-03	
16		3.13D-02	2.80D-02	2.46D-02	2.13D-02	1.80D-02	1.50D-02	1.23D-02	
15		3.22D-02	2.92D-02	2.61D-02	2.31D-02	2.02D-02	1.76D-02	1.51D-02	
14		3.26D-02	2.97D-02	2.68D-02	2.39D-02	2.11D-02	1.85D-02	1.60D-02	
13		3.24D-02	2.96D-02	2.68D-02	2.39D-02	2.12D-02	1.86D-02	1.61D-02	
12		3.17D-02	2.90D-02	2.62D-02	2.35D-02	2.08D-02	1.83D-02	1.59D-02	
11		3.02D-02	2.75D-02	2.50D-02	2.24D-02	2.00D-02	1.77D-02	1.56D-02	
10		2.72D-02	2.49D-02	2.27D-02	2.06D-02	1.86D-02	1.68D-02	1.52D-02	
9		2.17D-02	2.00D-02	1.85D-02	1.73D-02	1.62D-02	1.54D-02	1.47D-02	
8		1.20D-02	1.14D-02	1.14D-02	1.17D-02	1.24D-02	1.32D-02	1.42D-02	
7		-4.07D-03	-2.53D-03	-7.99D-05	3.00D-03	6.49D-03	1.02D-02	1.42D-02	
6		-2.80D-02	-2.31D-02	-1.68D-02	-9.52D-03	-1.64D-03	6.56D-03	1.49D-02	
5		-5.83D-02	-4.92D-02	-3.79D-02	-2.51D-02	-1.15D-02	2.49D-03	1.65D-02	
4		-8.88D-02	-7.59D-02	-5.96D-02	-4.12D-02	-2.16D-02	-1.44D-03	1.86D-02	
3		-1.16D-01	-1.00D-01	-7.96D-02	-5.59D-02	-3.04D-02	-4.33D-03	2.15D-02	
2		-1.62D-01	-1.37D-01	-1.06D-01	-7.31D-02	-3.85D-02	-3.50D-03	3.12D-02	
1		-1.62D-01	-1.37D-01	-1.06D-01	-7.31D-02	-3.85D-02	-3.50D-03	3.12D-02	

I =	16	17	18	19	20	21	22
J							
25	5.16D-05	4.38D-06	-3.93D-05	-7.88D-05	-1.06D-04	-1.16D-04	-1.06D-04
24	5.16D-05	4.38D-06	-3.93D-05	-7.88D-05	-1.06D-04	-1.16D-04	-1.06D-04
23	2.02D-03	1.78D-03	1.54D-03	1.31D-03	1.09D-03	8.96D-04	7.10D-04
22	3.71D-03	3.18D-03	2.69D-03	2.24D-03	1.84D-03	1.49D-03	1.17D-03
21	5.80D-03	4.68D-03	3.69D-03	2.88D-03	2.23D-03	1.75D-03	1.42D-03
20	6.37D-03	4.32D-03	2.62D-03	1.32D-03	4.72D-04	9.42D-05	1.65D-04
19	3.37D-03	1.56D-04	-2.51D-03	-4.46D-03	-5.52D-03	-5.53D-03	-4.40D-03
18	-5.42D-04	-4.59D-03	-8.01D-03	-1.05D-02	-1.15D-02	-1.06D-02	-6.98D-03
17	4.09D-03	1.57D-03	-2.82D-05	-3.82D-04	8.76D-04	4.09D-03	9.38D-03
16	1.01D-02	8.31D-03	7.16D-03	6.61D-03	6.57D-03	6.81D-03	6.84D-03
15	1.30D-02	1.12D-02	9.72D-03	8.51D-03	7.47D-03	6.47D-03	5.31D-03
14	1.38D-02	1.18D-02	1.00D-02	8.39D-03	6.88D-03	5.42D-03	3.97D-03
13	1.39D-02	1.18D-02	9.84D-03	8.06D-03	6.40D-03	4.82D-03	3.33D-03
12	1.37D-02	1.17D-02	9.80D-03	8.05D-03	6.41D-03	4.85D-03	3.37D-03
11	1.36D-02	1.18D-02	1.01D-02	8.56D-03	7.07D-03	5.61D-03	4.14D-03
10	1.37D-02	1.23D-02	1.11D-02	9.92D-03	8.75D-03	7.49D-03	6.02D-03
9	1.41D-02	1.36D-02	1.33D-02	1.29D-02	1.23D-02	1.14D-02	9.89D-03
8	1.53D-02	1.65D-02	1.77D-02	1.87D-02	1.92D-02	1.89D-02	1.73D-02
7	1.81D-02	2.21D-02	2.58D-02	2.91D-02	3.15D-02	3.23D-02	3.04D-02
6	2.32D-02	3.13D-02	3.89D-02	4.57D-02	5.09D-02	5.32D-02	5.09D-02
5	3.04D-02	4.38D-02	5.64D-02	6.74D-02	7.59D-02	7.99D-02	7.68D-02
4	3.82D-02	5.68D-02	7.39D-02	8.85D-02	9.90D-02	1.03D-01	9.89D-02
3	4.65D-02	6.97D-02	9.02D-02	1.07D-01	1.17D-01	1.19D-01	1.12D-01
2	6.50D-02	9.74D-02	1.27D-01	1.53D-01	1.72D-01	1.80D-01	1.71D-01
1	6.50D-02	9.74D-02	1.27D-01	1.53D-01	1.72D-01	1.80D-01	1.71D-01

I =	23	24	25
J			
25	-7.66D-05	-3.29D-05	0.00D+00
24	-7.66D-05	-3.29D-05	0.00D+00
23	5.35D-04	3.65D-04	0.00D+00
22	8.85D-04	6.01D-04	0.00D+00
21	1.20D-03	1.02D-03	0.00D+00
20	6.00D-04	1.24D-03	0.00D+00
19	-2.18D-03	7.72D-04	0.00D+00
18	3.02D-04	1.21D-02	0.00D+00
17	1.62D-02	2.20D-02	0.00D+00
16	5.91D-03	2.99D-03	0.00D+00
15	3.78D-03	1.67D-03	0.00D+00
14	2.49D-03	9.83D-04	0.00D+00
13	1.94D-03	7.10D-04	0.00D+00
12	1.99D-03	7.56D-04	0.00D+00
11	2.65D-03	1.12D-03	0.00D+00
10	4.22D-03	1.97D-03	0.00D+00
9	7.45D-03	3.71D-03	0.00D+00
8	1.36D-02	7.07D-03	0.00D+00
7	2.46D-02	1.31D-02	0.00D+00
6	4.17D-02	2.29D-02	0.00D+00
5	6.35D-02	3.64D-02	0.00D+00
4	8.25D-02	5.20D-02	0.00D+00
3	9.46D-02	7.38D-02	0.00D+00
2	1.39D-01	7.45D-02	0.00D+00
1	1.39D-01	7.45D-02	0.00D+00

		----- V (m/s) -----						
I =	1	2	3	4	5	6	7	
J								
25	0.00D+00	1.02D-01	2.58D-03	3.01D-03	3.49D-03	3.96D-03	4.34D-03	
24	0.00D+00	1.07D-01	2.69D-03	3.15D-03	3.65D-03	4.14D-03	4.54D-03	
23	0.00D+00	1.14D-01	5.43D-03	5.58D-03	5.73D-03	5.81D-03	5.79D-03	
22	0.00D+00	1.24D-01	1.16D-02	1.12D-02	1.04D-02	9.32D-03	8.09D-03	
21	0.00D+00	1.42D-01	2.68D-02	2.46D-02	2.05D-02	1.58D-02	1.12D-02	
20	0.00D+00	1.21D-01	9.00D-02	6.35D-02	4.24D-02	2.57D-02	1.29D-02	
19	0.00D+00	9.18D-02	1.05D-01	7.06D-02	4.25D-02	2.01D-02	2.80D-03	
18	0.00D+00	9.50D-02	1.08D-01	6.96D-02	3.73D-02	1.09D-02	9.93D-03	
17	0.00D+00	9.97D-02	1.10D-01	6.75D-02	3.09D-02	6.39D-04	2.35D-02	
16	0.00D+00	1.05D-01	1.14D-01	6.56D-02	2.42D-02	9.94D-03	3.73D-02	
15	0.00D+00	1.12D-01	1.19D-01	6.42D-02	1.77D-02	2.07D-02	5.14D-02	
14	0.00D+00	1.20D-01	1.25D-01	6.33D-02	1.10D-02	3.21D-02	6.66D-02	
13	0.00D+00	1.29D-01	1.31D-01	6.25D-02	3.83D-03	4.46D-02	8.33D-02	
12	0.00D+00	1.39D-01	1.39D-01	6.17D-02	4.29D-03	5.87D-02	1.02D-01	
11	0.00D+00	1.50D-01	1.47D-01	6.02D-02	1.39D-02	7.51D-02	1.24D-01	
10	0.00D+00	1.61D-01	1.54D-01	5.70D-02	2.59D-02	9.44D-02	1.49D-01	
9	0.00D+00	1.69D-01	1.58D-01	5.03D-02	4.17D-02	1.18D-01	1.78D-01	
8	0.00D+00	1.70D-01	1.53D-01	3.66D-02	6.31D-02	1.46D-01	2.12D-01	
7	0.00D+00	1.56D-01	1.30D-01	1.09D-02	9.25D-02	1.79D-01	2.48D-01	
6	0.00D+00	1.17D-01	8.02D-02	3.11D-02	1.30D-01	2.15D-01	2.83D-01	
5	0.00D+00	5.13D-02	3.11D-03	8.56D-02	1.70D-01	2.45D-01	3.07D-01	
4	0.00D+00	4.45D-03	5.60D-02	1.13D-01	1.76D-01	2.33D-01	2.83D-01	
3	0.00D+00	1.14D-01	1.27D-01	6.43D-02	1.60D-02	2.25D-02	5.23D-02	
2	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	
I =	8	9	10	11	12	13	14	
J								
25	4.59D-03	4.66D-03	4.53D-03	4.21D-03	3.71D-03	3.04D-03	2.21D-03	
24	4.80D-03	4.87D-03	4.73D-03	4.40D-03	3.88D-03	3.17D-03	2.31D-03	
23	5.63D-03	5.31D-03	4.82D-03	4.18D-03	3.41D-03	2.51D-03	1.49D-03	
22	6.80D-03	5.48D-03	4.19D-03	2.92D-03	1.69D-03	4.91D-04	6.97D-04	
21	7.10D-03	3.61D-03	7.41D-04	1.58D-03	3.43D-03	4.91D-03	6.10D-03	
20	3.26D-03	3.85D-03	8.94D-03	1.25D-02	1.48D-02	1.62D-02	1.70D-02	
19	-1.02D-02	-1.96D-02	-2.61D-02	-3.04D-02	-3.30D-02	-3.43D-02	-3.45D-02	
18	-2.59D-02	-3.76D-02	-4.60D-02	-5.16D-02	-5.52D-02	-5.70D-02	-5.73D-02	
17	-4.21D-02	-5.60D-02	-6.59D-02	-7.27D-02	-7.69D-02	-7.88D-02	-7.87D-02	
16	-5.84D-02	-7.41D-02	-8.53D-02	-9.29D-02	-9.73D-02	-9.91D-02	-9.83D-02	
15	-7.51D-02	-9.28D-02	-1.05D-01	-1.14D-01	-1.18D-01	-1.20D-01	-1.19D-01	
14	-9.32D-02	-1.13D-01	-1.27D-01	-1.36D-01	-1.41D-01	-1.43D-01	-1.41D-01	
13	-1.13D-01	-1.35D-01	-1.51D-01	-1.61D-01	-1.67D-01	-1.69D-01	-1.67D-01	
12	-1.36D-01	-1.61D-01	-1.78D-01	-1.90D-01	-1.96D-01	-1.98D-01	-1.96D-01	
11	-1.62D-01	-1.89D-01	-2.09D-01	-2.22D-01	-2.29D-01	-2.31D-01	-2.28D-01	
10	-1.91D-01	-2.22D-01	-2.44D-01	-2.58D-01	-2.66D-01	-2.68D-01	-2.65D-01	
9	-2.25D-01	-2.59D-01	-2.83D-01	-2.99D-01	-3.07D-01	-3.09D-01	-3.06D-01	
8	-2.62D-01	-2.99D-01	-3.25D-01	-3.42D-01	-3.51D-01	-3.53D-01	-3.49D-01	
7	-3.01D-01	-3.40D-01	-3.68D-01	-3.85D-01	-3.94D-01	-3.96D-01	-3.91D-01	
6	-3.36D-01	-3.76D-01	-4.03D-01	-4.20D-01	-4.29D-01	-4.31D-01	-4.26D-01	
5	-3.56D-01	-3.92D-01	-4.17D-01	-4.33D-01	-4.42D-01	-4.43D-01	-4.38D-01	
4	-3.22D-01	-3.51D-01	-3.72D-01	-3.85D-01	-3.91D-01	-3.92D-01	-3.88D-01	
3	-7.45D-02	-9.01D-02	-1.00D-01	-1.06D-01	-1.09D-01	-1.09D-01	-1.06D-01	
2	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	

I =	15	16	17	18	19	20	21
J							
25	1.22D-03	9.35D-05	-1.18D-03	-2.56D-03	-4.02D-03	-5.46D-03	-6.80D-03
24	1.28D-03	9.77D-05	-1.23D-03	-2.68D-03	-4.20D-03	-5.71D-03	-7.11D-03
23	3.59D-04	-8.96D-04	-2.27D-03	-3.75D-03	-5.29D-03	-6.81D-03	-8.22D-03
22	-1.90D-03	-3.14D-03	-4.44D-03	-5.81D-03	-7.22D-03	-8.63D-03	-9.96D-03
21	-7.10D-03	-7.96D-03	-8.76D-03	-9.55D-03	-1.03D-02	-1.11D-02	-1.19D-02
20	-1.72D-02	-1.70D-02	-1.65D-02	-1.57D-02	-1.47D-02	-1.36D-02	-1.26D-02
19	-3.37D-02	-3.20D-02	-2.93D-02	-2.57D-02	-2.11D-02	-1.56D-02	-9.69D-03
18	-5.61D-02	-5.32D-02	-4.83D-02	-4.08D-02	-2.99D-02	-1.48D-02	5.48D-03
17	-7.64D-02	-7.14D-02	-6.31D-02	-5.05D-02	-3.23D-02	-7.20D-03	2.64D-02
16	-9.48D-02	-8.80D-02	-7.72D-02	-6.14D-02	-3.97D-02	-1.09D-02	2.58D-02
15	-1.14D-01	-1.06D-01	-9.35D-02	-7.57D-02	-5.14D-02	-1.99D-02	1.98D-02
14	-1.36D-01	-1.27D-01	-1.13D-01	-9.27D-02	-6.58D-02	-3.10D-02	1.26D-02
13	-1.61D-01	-1.50D-01	-1.35D-01	-1.12D-01	-8.23D-02	-4.34D-02	5.22D-03
12	-1.89D-01	-1.77D-01	-1.59D-01	-1.34D-01	-1.01D-01	-5.71D-02	-2.68D-03
11	-2.21D-01	-2.08D-01	-1.88D-01	-1.59D-01	-1.21D-01	-7.26D-02	-1.15D-02
10	-2.57D-01	-2.42D-01	-2.19D-01	-1.87D-01	-1.45D-01	-9.04D-02	-2.21D-02
9	-2.96D-01	-2.79D-01	-2.54D-01	-2.19D-01	-1.72D-01	-1.11D-01	-3.56D-02
8	-3.38D-01	-3.20D-01	-2.92D-01	-2.54D-01	-2.02D-01	-1.36D-01	-5.42D-02
7	-3.80D-01	-3.60D-01	-3.31D-01	-2.90D-01	-2.35D-01	-1.66D-01	-8.07D-02
6	-4.14D-01	-3.94D-01	-3.64D-01	-3.23D-01	-2.69D-01	-2.00D-01	-1.17D-01
5	-4.27D-01	-4.08D-01	-3.80D-01	-3.42D-01	-2.92D-01	-2.30D-01	-1.58D-01
4	-3.79D-01	-3.63D-01	-3.40D-01	-3.09D-01	-2.69D-01	-2.21D-01	-1.65D-01
3	-1.01D-01	-9.23D-02	-7.95D-02	-6.17D-02	-3.79D-02	-7.49D-03	3.03D-02
2	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00

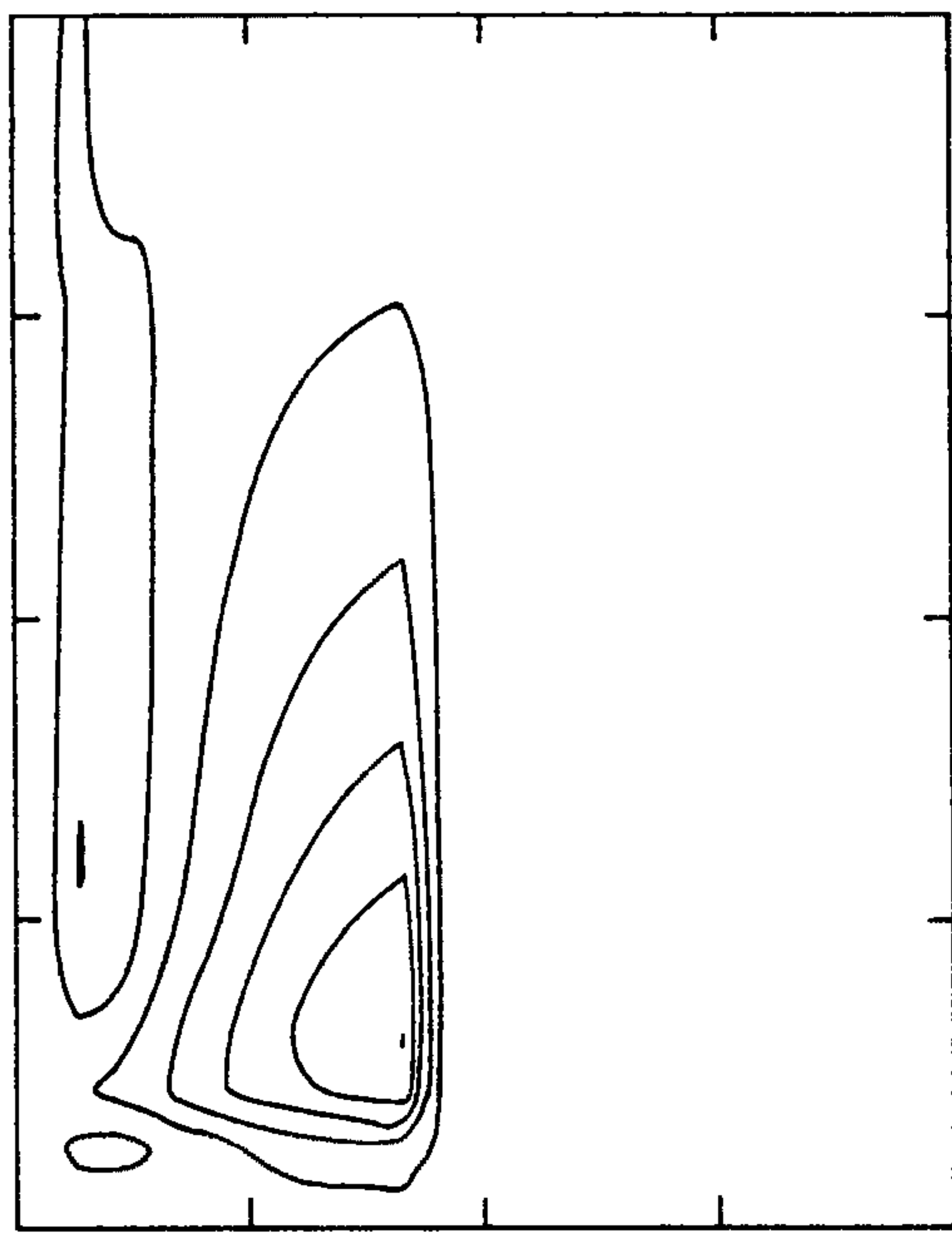
I =	22	23	24	25
J				
25	-7.92D-03	-8.70D-03	9.16D-02	0.00D+00
24	-8.28D-03	-9.09D-03	9.57D-02	0.00D+00
23	-9.40D-03	-1.02D-02	9.88D-02	0.00D+00
22	-1.11D-02	-1.19D-02	1.01D-01	0.00D+00
21	-1.27D-02	-1.34D-02	1.02D-01	0.00D+00
20	-1.19D-02	-1.18D-02	1.03D-01	0.00D+00
19	-4.17D-03	-6.48D-04	1.11D-01	0.00D+00
18	3.22D-02	6.70D-02	1.10D-01	0.00D+00
17	7.01D-02	1.25D-01	1.18D-01	0.00D+00
16	7.10D-02	1.25D-01	1.15D-01	0.00D+00
15	6.79D-02	1.24D-01	1.17D-01	0.00D+00
14	6.54D-02	1.27D-01	1.22D-01	0.00D+00
13	6.40D-02	1.33D-01	1.30D-01	0.00D+00
12	6.32D-02	1.40D-01	1.40D-01	0.00D+00
11	6.23D-02	1.49D-01	1.51D-01	0.00D+00
10	6.03D-02	1.57D-01	1.62D-01	0.00D+00
9	5.54D-02	1.62D-01	1.71D-01	0.00D+00
8	4.41D-02	1.58D-01	1.72D-01	0.00D+00
7	2.07D-02	1.37D-01	1.59D-01	0.00D+00
6	-2.04D-02	8.74D-02	1.19D-01	0.00D+00
5	-7.62D-02	8.97D-03	5.01D-02	0.00D+00
4	-1.05D-01	-4.97D-02	-9.47D-03	0.00D+00
3	7.63D-02	1.33D-01	1.25D-01	0.00D+00
2	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00

I =	15	16	17	18	19	20	21
J							
25	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02
24	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02
23	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02
22	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02
21	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02
20	2.99D+02	2.99D+02	2.99D+02	3.00D+02	3.00D+02	3.00D+02	3.00D+02
19	3.01D+02	3.03D+02	3.04D+02	3.05D+02	3.07D+02	3.08D+02	3.08D+02
18	3.10D+02	3.15D+02	3.21D+02	3.29D+02	3.37D+02	3.46D+02	3.52D+02
17	3.27D+02	3.41D+02	3.60D+02	3.87D+02	4.22D+02	4.67D+02	5.25D+02
16	3.36D+02	3.54D+02	3.79D+02	4.12D+02	4.54D+02	5.08D+02	5.72D+02
15	3.39D+02	3.58D+02	3.84D+02	4.18D+02	4.62D+02	5.17D+02	5.82D+02
14	3.39D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.18D+02	5.83D+02
13	3.39D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.19D+02	5.84D+02
12	3.40D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.19D+02	5.84D+02
11	3.40D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.19D+02	5.84D+02
10	3.40D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.19D+02	5.84D+02
9	3.40D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.19D+02	5.84D+02
8	3.40D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.19D+02	5.84D+02
7	3.40D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.19D+02	5.84D+02
6	3.40D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.19D+02	5.84D+02
5	3.39D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.19D+02	5.84D+02
4	3.39D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.19D+02	5.84D+02
3	3.39D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.19D+02	5.84D+02
2	3.39D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.18D+02	5.83D+02
1	3.39D+02	3.59D+02	3.85D+02	4.20D+02	4.64D+02	5.18D+02	5.83D+02

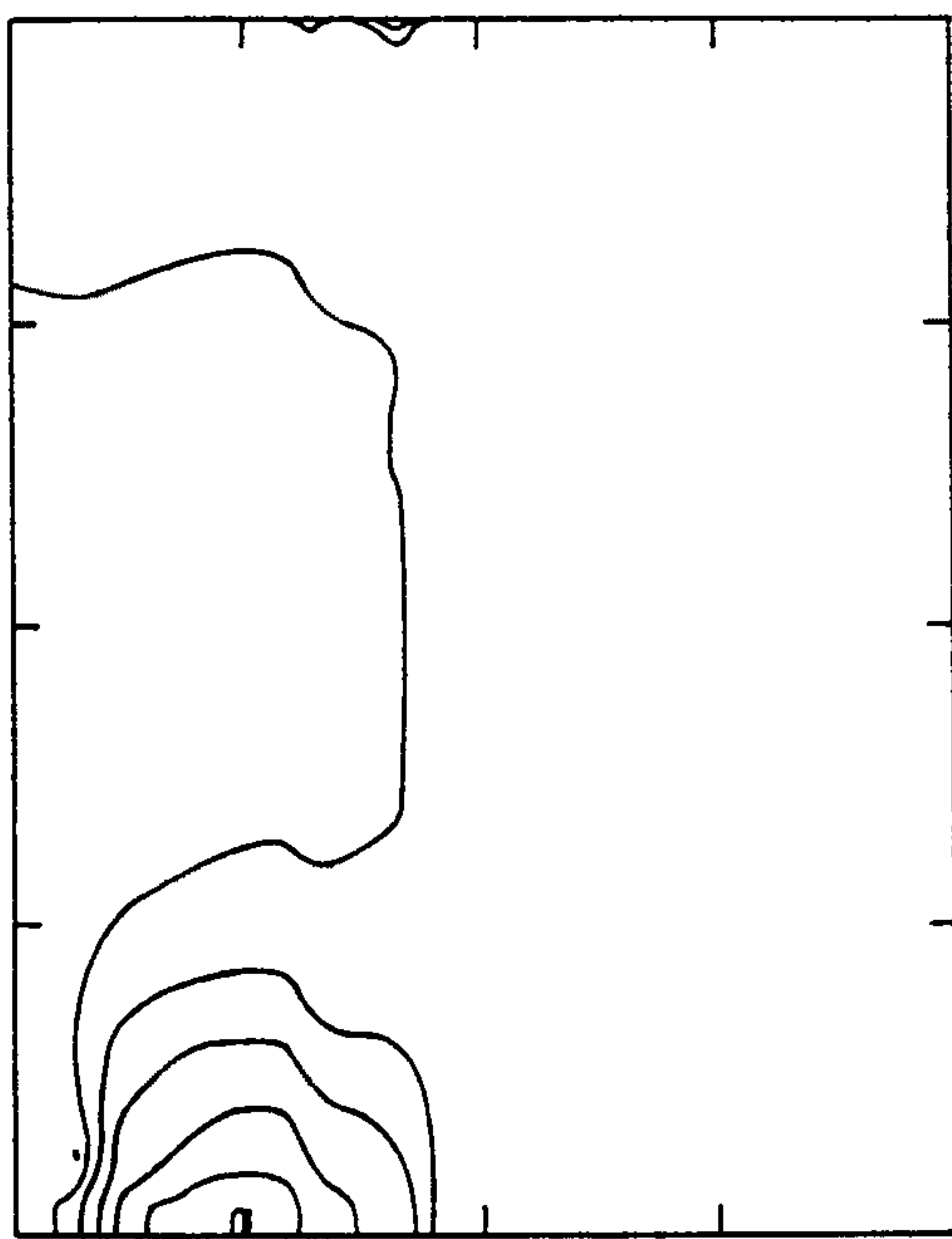
I =	22	23	24	25
J				
25	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02
24	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02
23	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02
22	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02
21	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02	2.98D+02
20	3.00D+02	2.99D+02	2.98D+02	2.98D+02
19	3.07D+02	3.05D+02	3.01D+02	2.98D+02
18	3.54D+02	3.47D+02	3.23D+02	2.98D+02
17	5.98D+02	6.88D+02	8.01D+02	8.73D+02
16	6.48D+02	7.33D+02	8.25D+02	8.73D+02
15	6.57D+02	7.39D+02	8.28D+02	8.73D+02
14	6.58D+02	7.40D+02	8.28D+02	8.73D+02
13	6.58D+02	7.41D+02	8.28D+02	8.73D+02
12	6.58D+02	7.41D+02	8.28D+02	8.73D+02
11	6.58D+02	7.41D+02	8.28D+02	8.73D+02
10	6.58D+02	7.41D+02	8.28D+02	8.73D+02
9	6.58D+02	7.41D+02	8.28D+02	8.73D+02
8	6.58D+02	7.41D+02	8.28D+02	8.73D+02
7	6.58D+02	7.41D+02	8.28D+02	8.73D+02
6	6.58D+02	7.41D+02	8.28D+02	8.73D+02
5	6.58D+02	7.41D+02	8.28D+02	8.73D+02
4	6.58D+02	7.41D+02	8.28D+02	8.73D+02
3	6.58D+02	7.41D+02	8.28D+02	8.73D+02
2	6.58D+02	7.40D+02	8.28D+02	8.73D+02
1	6.58D+02	7.40D+02	8.28D+02	8.73D+02

I =	15	16	17	18	19	20	21
J							
25	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01
24	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01
23	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01
22	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01
21	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01
20	6.46D-01	6.46D-01	6.45D-01	6.45D-01	6.45D-01	6.45D-01	6.45D-01
19	6.45D-01	6.45D-01	6.45D-01	6.45D-01	6.44D-01	6.44D-01	6.43D-01
18	6.45D-01	6.44D-01	6.43D-01	6.42D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.37D-01
17	6.43D-01	6.42D-01	6.40D-01	6.38D-01	6.34D-01	6.30D-01	6.24D-01
16	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.36D-01	6.32D-01	6.27D-01	6.21D-01
15	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.36D-01	6.32D-01	6.27D-01	6.20D-01
14	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.36D-01	6.32D-01	6.27D-01	6.20D-01
13	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.36D-01	6.32D-01	6.27D-01	6.20D-01
12	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.36D-01	6.32D-01	6.27D-01	6.20D-01
11	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.36D-01	6.32D-01	6.27D-01	6.20D-01
10	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.36D-01	6.32D-01	6.27D-01	6.20D-01
9	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.36D-01	6.32D-01	6.27D-01	6.20D-01
8	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.36D-01	6.32D-01	6.27D-01	6.20D-01
7	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.36D-01	6.32D-01	6.27D-01	6.21D-01
6	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.36D-01	6.32D-01	6.27D-01	6.21D-01
5	6.43D-01	6.41D-01	6.39D-01	6.37D-01	6.33D-01	6.28D-01	6.21D-01
4	6.43D-01	6.42D-01	6.40D-01	6.37D-01	6.33D-01	6.28D-01	6.22D-01
3	6.43D-01	6.42D-01	6.40D-01	6.37D-01	6.34D-01	6.29D-01	6.22D-01
2	6.43D-01	6.42D-01	6.40D-01	6.38D-01	6.34D-01	6.29D-01	6.23D-01
1	6.43D-01	6.42D-01	6.40D-01	6.38D-01	6.34D-01	6.29D-01	6.23D-01

I =	22	23	24	25
J				
25	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01
24	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01
23	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01
22	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01	6.46D-01
21	6.45D-01	6.45D-01	6.45D-01	6.45D-01
20	6.45D-01	6.45D-01	6.45D-01	6.45D-01
19	6.43D-01	6.42D-01	6.42D-01	6.42D-01
18	6.35D-01	6.33D-01	6.31D-01	6.31D-01
17	6.16D-01	6.06D-01	5.93D-01	5.87D-01
16	6.13D-01	6.03D-01	5.91D-01	5.84D-01
15	6.12D-01	6.02D-01	5.90D-01	5.84D-01
14	6.12D-01	6.02D-01	5.90D-01	5.84D-01
13	6.12D-01	6.02D-01	5.90D-01	5.84D-01
12	6.12D-01	6.02D-01	5.90D-01	5.84D-01
11	6.12D-01	6.02D-01	5.90D-01	5.84D-01
10	6.12D-01	6.02D-01	5.90D-01	5.84D-01
9	6.12D-01	6.02D-01	5.90D-01	5.84D-01
8	6.12D-01	6.02D-01	5.90D-01	5.84D-01
7	6.12D-01	6.02D-01	5.90D-01	5.84D-01
6	6.13D-01	6.03D-01	5.91D-01	5.84D-01
5	6.13D-01	6.03D-01	5.91D-01	5.84D-01
4	6.14D-01	6.03D-01	5.91D-01	5.85D-01
3	6.14D-01	6.04D-01	5.92D-01	5.85D-01
2	6.15D-01	6.04D-01	5.92D-01	5.85D-01
1	6.15D-01	6.04D-01	5.92D-01	5.85D-01



(a)



(b)

Figure 4. 6 Contours Converted from Model Calculation Results
(a) Contour of V (b) Contour of U

Thermal diffusion

반응기안에서 온도구배가 존재하고 또 그 온도구배가 심할 경우에 온도차이에 의한 thermal diffusion의 영향을 무시할 수 없게 된다. 그런데 본 모델에서는 이를 고려하지 않았는데 보다 정확한 모사를 위해 이를 포함시켜야 할 것이다.

graphic output

계산결과의 해석을 쉽게하기 위한 방법으로 수치를 graph로 전환하는 방법이 흔히 사용되고 있으며 본 연구에서도 이용되었다. 그런데 commercial package의 경우와 같이, 보다 사용이 편리하고 정보를 많이 보여줄 수 있는 것이 바람직하다.

variable mesh

복잡한 contour, 혹은 가스의 흐름, 가스의 농도 또는 온도가 급격히 변하는 부위에서는 계산의 정밀도를 높이기 위해서 mesh간격을 다른 부위에 비해서 좁힐 필요가 있다. 이러한 작업은 비교적 쉬운 일이지만 본 연구에서는 시도되지 않았다.

heating block/substrate/gas stream

증착이 일어나는 기판표면의 온도는 heating block과 기판사이의 열전달, 기판과 기판위를 흐르는 갯사이의 열전달, 증착반응열등에 의해서 결정되지만 본 연구에서는 주어진 기판온도에 대해서 모사하는데 그쳤다. 그러나 위의 제반현상을 고려한 총체적인 계산이 보다 현실감이 있음은 물론이다.

제 5 장 결 론

총 3년 연구사업의 1차년도인 본 연구기간 동안에는 CVD를 중심으로 대면적 박막제조장치에 관한 제반사항에 관한 검토를 하였으며 이에 기초하여 기본 공정설계를 수행하였다. 그리고 공정 및 장치개발의 중요 수단을 활용될 수 있는 전산모델을 개발하였다. 그러나 짧은 연구기간 및 연구비의 제약으로 인하여 수행할수 있었던 연구내용에는 한계가 있을 수 밖에 없었다. 그렇지만 2차년도에 수행하게 될 장치제작 및 증착실험에 필요한 기본은 확보 되었으며 대면적 박막제조공정 기술의 국내개발에 공헌하게 될 것임에 틀림이 없다 하겠다.

참 고 문 헌

- (1) 한국과학기술연구원 보고서 UCK99-4090-1, "THIN/THICK FILM기술의 현황과 전망에 관한 조사사업", 1991.
- (2) 한국과학기술연구소 보고서 N3301-2870-6, "LPCVD반응기 해석에 관한 연구", 1987
- (3) 한국과학기술연구소 보고서 BSE1032-3822-6, "저렴한 박막태양 전지제조공업에 관한 기초연구", 1990.
- (4) 한국과학기술연구원 보고서 N607-3854-6, N499-3607-6, N607-3854-6 "VLSI를 위한 CVD 및 Etching공정의 개발연구", 1988, 1989, 1990.
- (5) 한국전자통신연구소 보고서, "반도체 장비개발 및 공정DB확립", 1987.
- (6) 김도현;"집적 단위공정의 computer Simulation", 반도체 및 전자재료 기술의 최근동향, 한국과학기술원 산학협동강좌 1992.2.24-26, 서울, pp135-163.
- (7) Chinoy, Percy B., Deborah A. Kaminski, and Sorab K. Gandhi;"A Novel Reactor for Large-Area Epitaxial Solar Cell Materials", Solar Cells, Vol. 30, pp323-335(1991).
- (8) Colgan, E.G., K.Y. Ahn, and P.M. Fryer;"Comparison of Temperature Control Methods in Cold-Wall Single-Wafer LPCVD System", Proceeding of 1988 Workshop on "Tungsten and Other

- Refractory Metals for VLSI Applications IV”, R.S. Blewer and C. M. McConica(eds.), MRS(1989), pp205–209.
- (9) European Patent Application 0411317A2;“Method and apparatus for continuously forming functional deposited films with a large area by microwave plasma CVD”, Canon Kabushiki Kaisha, 1991.
- (10) Fair, R.B.;Challenges and Priorities for Two Dimensional Process Simulation”, in 2nd Int. Symp. on “Process Physics and Modeling in Semiconductor Technology”, G.R.Scrinivasan, J.D.Plummer, and S. T.Pantediles(eds.), The Electrochemical Society, Proceedgs. Vol.91–4 (1991), pp689–702.
- (11) Foster, Derrick, Arthur Learn, and Ted Kamins;“Silicon Films Deposited in a Vertical–Flow Reactor”, Solid State Technology, May 1986, pp227–232.
- (12) Gokolu, S.A., M. Kuczarski, L. Veiych, P. Tsui, and A. Chait;“A Numerical and Experimental Analysis of Reactor Performance and Deposition Rates For CVD Monofilaments”, in “Chemical Vapor Deposition XI”, K.E.Spear and G.W.Cullen(eds.), The Electrochemical Society, Proceedgs Vol. 90–12(1990), pp31–37.
- (13) Hammond, M.L.;“Epitaxial Silicon Reactor Technology–A Review”, Solid State Technology, May 1988, pp159–164.
- (14) Holbrook, D.S. and J.D. Mckibben;“Microlithography for Large Area Flat Panel Display Substrates”, Advanced and Future Microelectronics Workshop V, Suanbo, 1991.11.14–15.

- (15) Jasinski, T.J. and S.S.Kang; "Application of Numerical Modeling for CVD Simulation Test Case : Blaket Tungsten Deposition Uniformity", Proceedings of 1990 Workshop "Tungsten and Other Advanced Metals for ULSI Applications in 1990", G.C.Smith and Roc Blumenthal(eds.), MRS(1991), pp219–230.
- (16) Jensen, K.F.; "Chemical Vapor Deposition", Chapter 2 in "Microelectronics Processing—Chemical Engineering Aspects", D.W. Hess and K.F. Jensen(eds.), American Chemical Society, Adv. in Chemistry Ser. 221(1989).
- (17) Jensen, K.F., D.I. Fotiadis, T.J. Mountziaris, E.O. Einset, and T.F. Kuech; "Models of Chemical Kinetics and Transport Phenomena in Chemical Vapor Deposition Systems", Proceedings of 2nd Int. Sympos. on "Process Physics and Modeling in Semiconductor Technology", G.R. Srinivasan, J.D. Plummer, and S.T. Pantelides (eds.), The Electrochemical Socety, Proceedgs. Vol. 91–4(1991), pp142–160.
- (18) Jensen, K.F. and Werner Kern; "Thermal Chemical Vapor Deposition", in "Thin Film Processes II", J.L. Vossen and Werner Kern(eds.), Academic Press, New York(1991).
- (19) Kleijn. C.R., Th.H. van der Meer, and C.J. Hoogendoorn; "A Mathematical Model for LPCVD in a Single Wafer Reactor", J. Electrochemical Society, Vol. 136(11) 3423–3433(1991).
- (20) Komiyama, Hiroshi; "Present Status of Research on Chemical Vapor Deposition Methods and Significance of Chemical Engineering

- Approach”, Kagaku Kogaku Ronbunshu, 16(3) pp415–429(1990).
- (21) Michener, J.C. and Imad Mahawili; “LPCVD : Forced–Convection Flow and the Deposition of LTO, PSG, and BPSG Dielectric Films”, Solid State Technology, August 1987, pp109–113.
- (22) Murarka, S.P. and M.C. Peckerar; “Electronic Materials Science and Technology”, Academic Press, New York(1989).
- (23) Oh, In–Hwan, and C.G. Takoudis; “Modeling of Chemical Vapor Deposition in Pancake Reactor Systems”, in “Chemical Vapor Deposition XI”, K.E.Spear and G.W.Cullen(eds.), The Electrochemical Society, Proceedgs. Vol.90–12(1990), pp75–81.
- (24) O’Mara, William C.; “Active Matrix Liquid Crystal Displays Part I : Manufacturing process”, Solid State Technology, December 1991, pp65–70 ; “Part II : Markets”, January(1992), pp63–66.
- (25) Patankar, Suhas V. ; “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere Publishing Corporation, New Youk(1980).
- (26) Pulker, H.K.; “Coatings on Glass”, Elsevier, Amsterdam, 1984.
- (27) Schmitt, J.P.M.; “Problems in Large Size Amorphous Silicon Plate Manufacturing”, MRS Symp. Proc. Vol.219, pp631–642(1991).
- (28) Schmitz, J.E.J., J.L.G.Suijker, and M.J. Buiting; “Wafer Temperature in Cold Wall CVD Reactors”, Proceedings of 1988 Workshop on “Tungsten and Other Refractory Metals for VLSI Applications IV”, R.S. Blewer and C.M. McConica(eds.), MRS(1989), pp211–217.
- (29) Sparks, D.R., D.M. Dahlquist, P.S. Adam, and R.K. Reger; “A

- Comparison between Radiant and Induction Heated Epitaxial Reactors”, Solid State Technology, August 1987, pp101–104.
- 30) Tannas, L.E.Jr.;“Electroluminescent Displays”, Chap.8 in “Flat Plate Displays and CRTs”, L.E.Tannas, Jr.(ed.), van Nostrand Reinhold Co., New York(1985).
- 31) Thelen, Alfred and Peter Wirz;“Large Area Optical Coatings”, (eds)tnag J. and Yan Y., “Optical Coatings”, International Academic Publishers, New York, 1989.
- 32) Ulacia F., J. Ignacio;“Equipment Simulation : part 1”, Solid State Technology, November, 1990, pp107–113.
- 33) Vossen, J.L. and Werner Kern(eds.);“Thin Film Processes II”, Academic Press, New York(1991)
- 34) Zangwill, Andrew;“Physics at Surface”, Cambridge University Press, Cambridge(1988).
- 35) Zhu, Dewei, and Yogesh Sahai ;“Mathematical Modeling of Transport Phenomena in Chemical Vapor Deposition Processes”, Proceedings of 2nd Int.Symp. on “Process Physics and Modeling in Semiconductor Technology”, G.R.Srinivasan, J.D.Plummer, and S.T. Pantelides(eds.), The Electrochemical Society, Proceeds.Vol. 91–4 (1991), pp722–737.
- 36) Zweibel, Ken;“Harnessing Solar Power : The Photovoltaic Challenge”, Plenum Press(New York), 1990.

일본어 문헌

- (37) 室田淳一외;“CVD법에 의한 박막의 고속성장 및 선택성장”, 초
LSI기술 8 : 프로세스의 저온화, 반도체연구 21(1985).
- (38) 화학공학회(일본), “CVD 핸드북”, 조창서점, 도쿄, 1991.