

MOVPE 단결정층 성장법 III. 원자층 성장법

정 원 국

성균관대학교 재료공학과

Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy III. Atomic Layer Epitaxy

Weon Guk Jeong

*Department of Materials Engineering
Sung Kyun Kwan University*

Abstract

Atomic layer epitaxy is a relatively new epitaxial process characterized by the alternate and separate exposure of a substrate surface to the reactants containing the constituent elements of a compound semiconductor. The ideal ALE is expected to provide several advantageous aspects for growing complicated heterostructures such as relatively easy controls of the layer thickness down to a monolayer and in forming abrupt heterointerfaces through monolayer self-saturation of the growth. In addition, since ALE is strongly dependent on the surface reaction, the growth can also be controlled by photo-excitation which provides activation energies for each step of the reaction paths. The local growth acceleration by photo-excitation can be exploited for growing several device structures on the same wafer, which provides another important practical advantage. The ALE growth of GaAs has advanced to the point the laser operation has been achieved from AlGaAs/GaAs quantum well structures where the active layers were grown by thermal and Ar-laser assisted ALE. The status of the ALE growth of GaAs and other III-V compounds will be reviewed with respect to the growth saturation behavior and the electrical properties of the grown crystals.

1. 서 론

이질접합구조 전자소자에 대한 이해와 단결정층 성장법의 발달과 더불어 보다 고성능의 소자를 실현하기 위한 새로운 소자구조들이 제시되고 연구되고 있다. 새로운 소자들의 대부분은 다양한 형태의 에

너지 밴드 배열을 이용하는 구조로 되어있어 이들 구조를 성장시키기 위하여 결정성장조건을 매우 세밀, 정확하게 조절할 수 있는 결정성장 기술을 요구하고 있다. 대부분의 소자를 실현하기 위하여 결정 성장법에 요구되는 주된 사항은 몇 원자층 두께의 매우 얇은 결정층을 성장하는 기술, 이질접합에서의

성분의 grading을 최소화시키는 방법, 넓은 기판면적에서의 균일 두께 및 성분층을 얻는 기술등이다. 이러한 요구는 MOVPE와 MBE등과 같은 방법을 통하여 충족시켜 왔으며 이들 성장법의 발전을 통하여 더욱 세밀한 조절을 가능하게 하고자 노력하고 있다. 이러한 노력과 함께 또 다른 한편에서는 기존의 이와 같은 방법과는 다른 새로운 성장법의 개발을 통하여 위의 요구를 충족시키고자하는 연구가 계속되어 왔다. 원자층성장법(Atomic Layer Epitaxy, ALE)은 이러한 시도의 하나로 결정성장반응 스스로가 나타내는 성장포화를 통하여(self-saturation of growth) 결정성장의 각 단계에서 단 하나의 원자층만을 성장시키므로써 얇은 두께, abrupt 이질접합, 균일성등을 얻고자 하는 성장법이다.

원자층 성장법은 Suntola¹⁾ 등에 의하여 처음 제시되었다. 이들은 ZnS의 얇은 박막을 형성하는 방법의 하나로 진공에서의 evaporation을 응용하는 새로운 방법을 시도하여 성공할 수 있었다. 그 후 다양한 종류의 단결정 및 다결정 II-VI 화합물반도체를 이 방법을 통하여 성공적으로 성장할 수 있었으며 최근에는 III-V 화합물반도체를 성장시키는데 이 방법을 응용하는 시도가 진행되고 있다. 한편 원자층성장법은 표면에 흡착된 반응물의 표면에 의한 활성화에 의존하는 성장법이기때문에 활성화에너지를 외부에서 광에너지 등을 통하여 공급할 수 있다는 특징이 있다. 이 특징은 원자층 성장법이 갖는 큰 장점중의 하나로써 기판위의 원하는 부분에 선택적으로 결정을 성장시킬 수 있어 서로 다른 구조의 여러 전자소자를 하나의 기판위에 성장시키는 방법으로 유망시되고 있다.

2. 이상적 원자층성장법

2. 1. 이상적 원자층 성장법의 원리

원자층성장법에서 이용하고자 하는 결정 성장의 기본 원리는 다음의 예를 통하여 설명할 수 있다. 간단한 예로 2상 화합물(binary compound) AB를 성장하는 방법을 생각하여 보자. 그림 1의 (a)의 경우와 같이 원자형태의 A와 B를 반응물로서 사용하며 이들을 수소가스를 운반가스로 하여 반응로 내의 기판위에 공급한다고 한다. 이예의 경우, 원자층성장법의 한 주기는 A 원자의 공급, 수소가스로의 퍼징(purging), B 원자의 공급, 수소가스로의 퍼징의 순차적 단계로 구성한다. B원자층을 표면 최상층으로

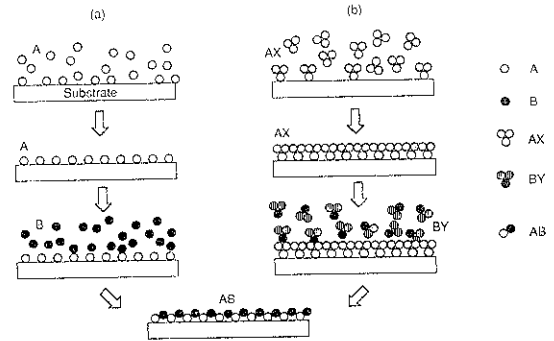


Fig. 1. 이상적 ALE반응 원리의 개략도.

갖는 기판이 A원자의 공급을 받으면 기판의 온도가 적당한 경우 A원자는 기판 표면에 흡착한 후 최상층에 놓여 있기에 B원자들이 갖게되는 dangling bond와 결합을 하게 된다. 공급되는 A원자의 수가 충분하면 모든 B원자의 dangling bond는 A원자와 결합을 하게 되어 B원자층위에 한층의 A원자층이 형성되고 여분의 A원자는 A층위에 흡착하게 된다. 만약 A-B bond가 강한 화학결합이고 A-A 결합이 약한 물리결합이면 두번째 단계의 수소가스로의 퍼징시 A층위의 A원자들은 약한 결합을 깨고 반응로 밖으로 제거될 것이다. 따라서 이 때 단 하나의 A원자층만이 B원자층위에 형성되게 된다. 이 상태의 기판에 B원자를 공급하면 B원자는 기판 표면의 A원자의 dangling bond와 결합하여 A-B bond를 형성한다. 이때 공급되는 B원자의 양이 충분하면 모든 A원자의 dangling bond는 B원자와 결합하고 여분의 B원자는 B원자층 위에 흡착하게 된다. 이때 B-B bond가 약한 물리 결합일 경우 B원자층 위의 B원자들은 수소가스로의 퍼징시 기판위에서 제거된다. 이와 같은 4단계로 구성되는 한 주기 후에는 단 하나의 AB 화합물층이 형성되게 될 것이다. 따라서 이러한 주기를 반복하면 반복한 수만큼 AB 화합물층이 형성될 것이다.

위와는 다르게 반응물을 화합물의 형태로 공급하는 경우에도 결정성장이 일어나는 반응의 상세한 경로는 사용하는 화합물의 화학적성질에 따라 달라지겠지만 기본원리는 유사하다. A원자를 공급하기 위하여 AX, B원자를 공급하기 위하여 BY라는 화합물을 사용하는 경우를 생각하여 보자. 주기의 첫단계에서 B원자층을 표면 최상층으로 갖는 기판에 AX를 공급한다. 이 때 기판에 도달하는 A 반응물의 형태

는 AX의 열분해 성질에 따라 달라질 것이다. 즉, AX가 기체상에서 완전히 열분해하여 A원자 형태로 B의 dangling bond와 결합하는 경우, AX가 전혀 분해하지 않고 기판에 흡착하는 경우, 혹은 전혀 분해하지 않고 기판에 공급되나 표면에 의하여 활성화되어 A원자 혹은 몇단계의 분해를 거친 형태로 B원자와 결합을 하는 경우, 또는 기체상에서 일부 분해한 형태로 기판에 공급되는 경우 등이 있을 수 있다. 이의 형태를 대표적으로 AX' 이라고 하기로 한다. 공급되는 AX의 양이 충분하면 기판위의 모든 B원자의 dangling Bond는 AX' 과 화학결합을 하게되고, 여분의 AX' 은 다음 단계의 수소가스 피징에 의하여 제거되어 단 하나의 AX' 층만이 형성된다. 다음 단계에서 BY가 BY' 의 형태로 기판에 공급되면 기판위의 AX' 과 반응하여 AB 화합물층을 형성하고 X' Y' 을 반응결과물(by-product)로 생성한다. 이때 B원자층위에 흡착된 BY' 은 수소가스 피징단계에서 제거된다. 이 결과 한 주기에 단 하나의 AB화합물층이 형성된다.

2.2 광에너지 활성화 ALE

한편 화합물을 반응물로 사용하는 경우 반응물의 분해에 필요한 활성화에너지를 열에너지가 아닌 다른 방법을 통하여 공급할 수도 있다. 이러한 방법중의 하나가 광에너지를 이용하는 방법인데 광에너지 활성화를 이용한 반도체 결정성장은 Nishizawa²⁾ 등에 의하여 시작되어 Si³⁾ 과 GaAs⁴⁾ 기상성장법(Vapor phase Epitaxy, VPE) 에 사용되었었다. 광에너지를 이용하는 방법은 반응물의 분해과정의 각 단계를 각 단계의 활성화에너지에 해당하는 적당한 파장의 빛을 쬐이므로써 독립적으로 조절할 수 있다는 장점이 있다. 즉, 적당한 파장의 빛을 이용하여 필요한 radical 혹은 ion을 선택적으로 생성시킬 수 있다. 아울러 이 방법으로는 열에너지에 의한 성장의 경우보다 더욱 낮은 온도에서 결정을 성장시킬 수 있다는 장점이 있다. 즉 적당한 파장의 빛을 이용하여 필요한 radical 혹은 ion을 선택적으로 생성시킬 수 있다. 아울러 이 방법으로는 열 에너지에 의한 성장의 경우보다 더욱 낮은 온도에서 결정을 성장시킬 수 있다는 장점이 있다. 이러한 방법을 ALE의 표면 반응을 조절하는데 사용할 수 있으며 이러한 방법을 광 ALE(Photostimulated 혹은 Photoassisted 혹은 Photo ALE) 라고 한다. 가장 많이 사용되는 광에너지원으로는 레이저가 있으며 이러한 경우의 ALE를 레이저

ALE(Laser assisted ALE, LALE)라고 한다.

2.3 원자층 성장법의 특징

이상에서 본 바와 같이 원자층 성장법은 일반적인 단결정층 성장법의 경우 성장하고자 하는 화합물의 구성원자를 함유하는 반응물을 동시에 기판에 공급하는 데에 반하여 한 주기의 각 단계에서 한 종류의 반응물만을 공급하는 방법이다. 이와 같은 독특한 공급 방식에 의하여, 이상적인 경우 결정층은 한 주기당 하나의 화합물층만을 형성하는 특징을 갖는다. 이 결과 얻을 수 있는 장점은 아래와 같이 요약될 수 있다.

- (1) 결정층의 두께를 원자층 두께 별로 조절 할 수 있다 : 결정층의 두께는 주기의 수로써 조절 할 수 있어 하나의 원자층 두께로 부터 제한이 없다.
- (2) 결정성장속도는 반응물을 기판의 dangling bond를 포화시키기 에 충분한 양이상을 공급하기만 하면 반응물의 양에 무관하다. 즉 그림 2에서 보인 것과 같이 성장속도는 반응물의 양에 무관하다. 이것은 결정성장속도가 III족 반응물의 양에 의하여 결정되는 MOVPE와 대별되는 것으로 미세구조를 성장하는 데에 매우 유용한 장점이다.

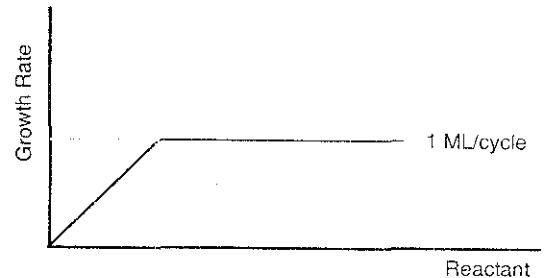


Fig. 2. 이상적 ALE의 성장포화.

- (3) 성분의 grading이 없는 abrupt 이질접합을 얻을 수 있다 : 각단계에서 하나의 포화된 원자층을 형성하므로 형성된 원자층은 그 위에 성장되는 결정층에 영향을 받지 않아 abrupt 이질접합을 형성할 수 있다.
- (4) 넓은 기판 면적에 일정한 두께, 성분의 결정층을 성장할 수 있다 : 각 단계에서 하나의 원자층이 형성되므로 기판 전체에 충분한 반응물을 공급한다면 기판의 면적에 관계없이 균일한 결정층을 성장시킬

수 있다.

(5) 국부적으로 결정성장 부위를 선택할 수 있다 (Selective growth) : 2.2에서 설명한 광 ALE의 원리를 이용하여 기판의 일정부위에만 광에너지를 공급하므로써 국부적으로 결정성장이 일어나게 조절할 수 있다. 즉, 기판의 온도를 낮추고 기판의 일정한 부위에만 적당한 과장을 갖는 빛을 쬐이면 기판에 흡착한 반응물은 빛을 쬐인 부위에서만 분해될 일으키기에 충분한 활성화에너지를 제공받기 때문에 이 부위에서만 결정이 성장한다. 이와 같이 광에너지를 사용하여 국부선택적으로 결정을 성장하는 방법은 하나의 기판위에 서로 다른 구조를 갖는 다양한 전자소자를 성장할 수 있다는 큰 장점을 갖는다.

그러나 원자층 성장법은 이상과 같은 장점을 갖는 반면 반응물들을 쬐이지 않고 반응로내에 공급하여야 하는 제약에 의하여 일반적으로 한 주기를 수행하는 시간에 수 초가 필요하고 또한 이 수 초동안 단 한층의 원자층만이 성장되기 때문에 일반적인 성장법에 비하여 성장속도가 매우 낮다. 이를 극복하는 하나의 방법으로 원자층성장법은 얇은 결정층이나 이질접합을 형성하는 경우에만 사용하고 두꺼운 결정층은 MOVPE, Chloride-VPE 혹은 Hydride-VPE의 일반적인 방법을 사용하는 원자층성장법과 일반 성장법을 함께 사용하는 방법을 사용할 수 있다.

2.4 원자층성장법에서의 요구조건

2.1에서 설명한 원리와 같은 형태로 결정성장이 진행하기 위하여는 몇가지의 조건이 충족되어야 한다. A-B bond, 즉 서로 다른 종류의 원자결합은 강한 화학결합이고, A-A 및 B-B bond, 즉, 서로 같은 종류의 원자결합은 퍼징 혹은 evacuation 등의 방법에 의하여 제거될 수 있는 아주 약한 물리 결합이어야 한다. 즉, 이 성장법은 반응물의 기판표면에서의 흡착(adsorption) 및 탈착(desorption)에 크게 의존하는 방법이며 또한 흡착율과 탈착율은 기판의 온도 및 반응로내의 기압에 따라 결정되므로 적당한 기판 온도 및 반응로 기압등의 조건에서 이와 같은 성질의 결합을 얻을 수 있는 적당한 반응물의 유무 여부가 원자층 성장법의 성공여부를 결정한다. 이와 더불어 화합물을 반응물로 사용하는 경우 반응의 결과로 생기는 결과 물과 기판의 결합력이 약하여 이들이 불순물로 결정에 취입되지 않고 쉽게 제거되어 순수한 결정을 얻을 수 있어야 한다. 따라서 어떤 반응물을 사용하고자 할때, 반응물들이 위와 같은 성질의 결합

을 갖고 순수한 결정을 만드는 적당한 반응 온도 및 기압등을 찾아내는 것이 중요하다.

3. 원자층성장법에서의 현황

3.1 연구의 주제점

Suntolar 등에 의한 처음 시도에 이어 ALE를 통한 화합물 반도체 성장에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 이들 연구의 주제점은 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) ALE 결정성장시 과연 이상적인 ALE가 제시하는 바와같이 결정성장이 단원자층만의 성장에서 포화되고 더이상의 성장은 일어나지 않는가 (monolayer saturation)

(2) 이상적 ALE를 실현하기 위하여 가장 적당한 반응물은 어떤 것이며 어떤 성장조건, 즉, 기판온도와 반응로내의 기압이 필요한가.

(3) 성장 결정에의 불순물은 얼마 정도이며 불순물의 함유정도는 결정 성장조건과 어떤 관계를 갖는가. 함유 불순물양을 일반적 성장법에 의하여 얻을 수 있는 수준으로 내리기 위하여 어떤 반응물, 성장조건이 필요한가.

(4) ALE반응이 진행되는 화학반응 경로는 어떤 것인가.

(5) 광ALE의 경우

(a) 광에너지는 열분해의 일정한 화학반응을 선택적으로 촉진시키는 화학적 에너지인가 아니면 단지 열에너지를 공급하는 역할을 하는데 그치는가.

(b) 각각의 반응물에 대한 가장 적합한 빛의 파장은 얼마인가.

(c) 광ALE에 의하여 성장포화를 일으키는 빛의 세기(power)는 어떤영역인가.

이상의 것들에 대한 연구는 비교적 초기 단계이거나 나뉘대로 진전이 있어 광에너지를 이용하여 반도체 레이저를 기판에 국부적으로 성장시킬 수 있는 단계에 와 있다. 현재 까지의 연구 진척사항을 아래에 검토하여 본다.

3.2 II-VI 화합물의 ALE⁵⁾

ALE는 electroluminescence display용 II-VI 화합물을 성장시키기 위한 방법으로 개발되었다. II-VI 화합물의 경우 성공적인 ALE를 위한조건, 즉, 화합물의 구성원소가 갖는 가스압이 반응물의 형태로 있을 경

우에 화합물을 형성한 상태보다 훨씬 커야 한다는 조건을 대부분의 경우 충족시킨다. 원자상태의 Zn, ZnCl₂, Zn(CH₃COO)₂와 H₂S를 사용한 ZnS, Zn(CH₃COO)₂와 H₂O를 사용한 ZnO, AlCl₃와 H₂O를 이용한 Al₂O₃, TaCl₅와 H₂O를 이용한 TaO₂ 등의 다결정 혹은 아모퍼스상을 ALE를 통하여 아모퍼스 기판위에 성공적으로 성장할 수 있었다는 보고가 있다. 아울러 II-VI 화합물의 단결정 및 CdTe-CdMnTe 양자우물구조를 ALE를 통하여 성장할 수 있었다고 보고되어 있다.

3.3 III-V 족 화합물의 ALE

3.3.1 GaAs의 ALE

GaAs는 III-V 족 화합물 반도체중 ALE로의 성장에 대하여 가장 많이 연구된 반도체이다. GaAs의 ALE에 대하여는 다양한 성장조건에서의 결정성장에 대한 결과가 보고되어 있다. 즉, 극저압(Ultra-high va-

cuum, UHP)에서 상압에 이르기 까지, 여러형태의 반응로에서의 연구가 보고되었으며 III족 반응물로서 trimethylgallium (TMGa), triethylgallium (TEGa), triethylgalliumchloride (TEGaCl) 등이 사용되었으며, V족 반응물로서 AsH₃ 및 고체상의 As등이 사용되었다.

많은 반응물중에서 TMGa과 AsH₃ 이 GaAs ALE를 위하여 가장 많이 사용되어 왔다. Nishizawa⁶⁾ 등은 GaAs의 ALE을 처음 시도한 그룹으로서 이들은 UHV 조건에서 TMGa과 AsH₃ 를 사용하고 각 반응물의 공급사이에 evacuation 단계를 두어 ALE를 시도하였다. 이들은 400℃와 500℃사이의 온도에서 단원자층성포화를 관찰할 수 있었다고 보고하였으며 이들의 데이터는 500℃에서 주기당 약 0.8 원자층이 성장된 것을 보인다. 이와같은 불완전한 성장포화에 비하여 Tischler⁷⁾ 등은 주기당 하나의 원자층(1ML/cycle)을 성장시킬 수 있었다는 보고를 하였다. 이들

표 1. GaAs 의 ALE

연구자	반응물	반응로 기압	성장포화 온도(℃)	전도성	Free carrier 농도(cm ⁻³)	μ77 (cm ² /V.s)	활성화법
Nishizawa	TMGa,AsH ₃	10 ⁻⁵ torr	450~500	p-type	10 ¹⁸ ~10 ²⁰	—	열 ALE
Tischler	TMGa,AsH ₃	760 torr	450~700	p-type	10 ¹⁵ ~5x10 ¹⁷	—	열 ALE
Denbarrs	TMGa,AsH ₃	760 torr	445	p-type	—	—	열 ALE
Ozeki	TMGa,AsH ₃	20 torr	450~500	n-type	1.6x10 ¹⁵	65,000	열 ALE
Ozeki	TMGa,AsH ₃	<20 torr	440~560	n-type	2x10 ¹⁴	65,000	열 ALE
Mochizuki	TMGa,AsH ₃	20 torr	500℃	n-type	1x10 ¹⁴	80,000	열 ALE
Ohno	TMGa,AsH ₃	760 torr	350~450	p-type	5x10 ¹⁷ ~	—	열 ALE
Doi	TMGa,AsH ₃	100 torr	—	p-type	6~70x10 ¹⁷	24~200	Ar laser ALE
Aoyagi	TMGa,AsH ₃	100 torr	370~430	—	—	—	Ar laser ALE
Karam	TMGa,AsH ₃	760 torr	300~400	—	—	—	Ar laser ALE
Nishizawa	TMGa,AsH ₃	<10 ⁻⁵ torr	~300	p-type	10 ¹⁶	—	열 ALE
Nishizawa	TMGa,AsH ₃	<10 ⁻⁵ torr	275~430	—	—	—	Hg lamp ALE
Aoyagi	TMGa,AsH ₃	100 torr	350~365	—	—	—	Ar laser ALE
Meguro	TMGa,AsH ₃	100 torr	350~380	—	—	—	열 ALE
Ohno	TMGa,AsH ₃	760 torr	350	—	—	—	열 ALE
Mori	DEGaCl,AsH ₃	100 torr	450~600	p-type at 525℃, N-type at 600℃	3x10 ¹⁵ 1.1x10 ¹⁵	3,250 22,400	열 ALE
Sasaoka	DEGaCl, As	760 torr	425~475	p-type	5x10 ¹⁵ ~ 5x10 ¹⁷ at 425~500℃	150~2500	열 ALE

은 quartz 반응로를 4개의 통로로 구획지어 각 통로를 통하여 TMGa, 수소, AsH₃ 수소를 흘려보내고 기판을 받치고 있는 susceptor를 회전시키어 상압하에서 기판에 4가지의 반응물을 순차적으로 공급하는 방법을 사용하였다. 이들은 450~700 °C의 온도영역에서 단원자층 두께의 성장포화를 얻을 수 있었다고 보고하였고 아울러 성장포화는 공급하는 AsH₃의 양과 기판의 두 결정방향, (100)와 (111)에 관계없이 일어난다고 보고 하였다. 그러나 이들의 보고와는 상이하게 성장포화는 성장온도에 민감하게 영향을 받는다는 많은 보고가 있다. DenBaars⁸⁹⁾ 등은 수평형태의 상압 MOVPE 반응로에서 injection manifold의 밸브 스위칭을 통하여 TMGa와 AsH₃를 ALE 형태로 공급하여 445 °C에서 거의 단원자층으로의 성장포화가 일어나는 것을 보고하였다. 그러나 성장층의 두께는 성장온도에 매우 민감하여 이보다 높은 온도에서는 단원자층의 두께보다 큰 결정층이 성장되어 단원자층의 두께를 얻을 수 있는 온도 범위가 매우 제한되어 있음을 보인다. Ohno¹⁰⁾ 등은 상압 반응로를 이용하여 450 °C에서 단원자층 두께의 성장포화가 일어남을 보고하였다. 아울러 이들은 AsH₃ 공급시간을 증가시키거나, TMGa의 공급량을 높이거나, 또는 AsH₃를 미리 열분해하여 공급하거나하여 성장포화 온도를 낮출 수 있었다고 보고하였다. Ozeki¹¹⁾ 등은 저압 MOVPE 반응로를 사용하여 450~500 °C에서 단원자층 두께의 성장포화를 얻을 수 있었다고 보고하였다. 그러나 이들의 데이터도 이상적 ALE가 제시하는 바와 같은 완전한 포화는 나타내지 못하고 있고 TMGa의 공급량이 증가함에 따라 성장층의 두께도 다소 증가하는 것을 나타낸다. 한편 Ozeki¹²⁾ 등은 반응물을 제트 형태(Pulsed jet)로 공급하는 방법을 사용하여 440~560 °C의 온도 영역에서 온도에 관계없이, TMGa의 공급량에 관계없이 단원자층 두께의 성장포화를 얻을 수 있었다고 보고 하였다. 이들이 보인 TMGa량에 따른 성장포화 정도는 DenBaars, Ohno 및 Ozeki 등에 비하여 매우 강한 것을 나타내어 TMGa와 AsH₃를 사용하여 이상적 ALE가 제시하는 것과 비슷한 성장거동을 실현할 수 있다는 것을 보인다.

이상과 같이 열에너지에 의존하는 ALE 이외에 광에너지에 의한 ALE에 대한 연구도 다수 보고되어 있다. Nishizaw¹³⁾ 등은 TMGa의 공급기간, AsH₃의 공급기간, evacuation 기간등에 KrF 레이저를 조사하여 결정 성장에 미치는 영향을 연구하였다. Doi¹⁴⁾ 등

은 Ar 레이저를 사용하여 TMGa 공급기간에 조사한 경우 성장속도가 증가하나 AsH₃ 공급기간의 조사는 성장속도에 영향을 주진 않는다고 보고하였다. 특히 이들은 0.7mm의 직경으로 레이저 빛을 국한시키어 국부적인 결정 성장을 얻을 수 있었는데 성장된 부위의 상층부(top)가 평평하게 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. 아울러 LALE의 경우에는 넓은 범위의 성장 온도에서 성장속도가 일정한 것으로 측정되어 성장 온도가 증가함에 따라 성장속도가 서서히 증가하는 열에너지에 의한 ALE와 구별되는 특징을 관찰하였다. 이러한 두가지 LALE의 특징으로부터 레이저 조사에 의한 효과는 열에너지를 공급하는 것이 아니라 광화학적 에너지(Photochemical energy)를 공급하는 효과를 가진 것으로 결론지을 수 있다고 보고하였다. 레이저 빛의 강도는 gaussian 분포를 하므로 만약 레이저의 역할이 단지 기판의 온도를 높여 결정 성장을 촉진시키는 것이었다면 촉진되는 모양도 gaussian 이고 따라서 평평한 상층부를 갖지 못한다는 이유에서이다. 실제로 일반적인 MOVPE의 경우 레이저 빛에 의하여 성장을 촉진시킬 때 gaussian 분포를 나타내는 반구형(hemispherical)의 성장촉진을 관찰할 수 있다. 아울러 레이저 조사로 인하여 Ga층에서의 TMGa의 lifetime이 As층에서의 TMGa의 분해속도에 비하여 40배 증가되는 것으로 계산되었음을 보고하였다. 즉 TMGa의 Ga표면층에서의 분해속도에 대한 As표면층에서의 분해속도의 비는 레이저 조사가 없는 경우 1이던 것이 레이저 조사의 경우 40으로 As 표면층에서의 TMGa의 분해가 촉진되는 것으로 유추하였다. Aoyagi¹⁵⁾ 등에 의하여 계속된 연구에서 이들은 Ar 레이저를 조사할 경우 370~430 °C의 온도 영역에서 성장 포화가 일어나며 150~230W/cm²의 레이저 강도영역에서 성장온도가 일정하다고 보고하였다. Karam¹⁶⁾ 등은 TMGa공급기간에 500μm의 크기로 focusing된 Ar 레이저 빛을 조사하여 300~400 °C의 온도 영역에서 주기당 단원층의 성장속도를 얻을 수 있었다. 400 °C의 온도에서는 200~300W/cm²의 레이저 강도영역에서 강도에 관계없이 1ML/cycle의 성장속도를 얻을 수 있었다. DenBaars¹⁷⁾ 등도 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 및 GaAs 위에 GaAs 피를 성장시킬 수 있었다. 4개의 방으로 구분된 반응로내에서 기판을 회전시키고 각각의 방에 반응물을 흘려보내어 기판에 TMGa, 수소, AsH₃ 수소를 순차적으로 공급하며 이때 Ar 레이저 빛을 TMGa공급기간에 기판에 조사되게 하는 방법을 사용하여 Plateau top을 보이는 GaAs 피를 성장

시킬 수 있었다. 레이저빔의 크기를 $40\mu\text{m}$ 로 하여 $275\sim 375\text{mW}$ 의 레이저 강도영역에서 주기당 단원자층의 성장속도를 얻을 수 있었다.

한편, AsH_3 은 GaAs ALE의 성장속도에 거의 영향을 주지 않는 것으로 보고되어 있다. AsH_3 의 공급량이 열분해후 GaAs의 stoichiometry를 만족시키기에 충분한 양 이상이기만 하면 성장속도는 AsH_3 의 양에 영향을 받지 않는다. 또한, AsH_3 의 공급기간중에 레이저를 조사하여도 성장속도는 일어나지 않는 것으로 보고 되었다.

TMGa도 또한 GaAs ALE의 반응물로써 연구되었다. Nishizawa¹⁸⁾ 등은 TMGa대신 TEGa를 사용하여 TMGa의 경우보다 낮은 온도인 320°C 에서 주기당 하나의 원자층이 성장하는 결과를 얻을 수 있었다고 보고하였다. 그러나 이 경우에는 TMGa를 사용하는 경우에 비하여 훨씬 많은 양의 AsH_3 를 공급하여야 하였고 이는 저온에서 AsH_3 의 열분해가 감소하기 때문이라고 유추하였다. 그러나 이들의 데이터는 TMGa를 사용한 열 ALE의 경우에서와 같이 성장속도가 온도에 매우 민감하게 변화하는 것을 보인다. 한편, Hg lamp를 이용한 광ALE의 경우에는 $275\sim 430^\circ\text{C}$ 의 넓은 온도영역에서 주기당 단원자층의 성장포화를 얻을 수 있었으며 또한 표면의 morphology가 향상되는 것을 관찰할 수 있었다. Aoyagi¹⁵⁾ 등은 Ar 레이저를 사용하여 $350\sim 365^\circ\text{C}$ 의 온도영역에서 성장포화가 일어나면 $60\sim 250\text{W}/\text{cm}^2$ 의 레이저 강도영역에서 강도에 관계없이 성장속도가 일정한 것을 관찰할 수 있었다. Meguro¹⁹⁾ 등은 Ar 레이저의 355.0nm 와 514.5nm 의 파장의 빛을 이용하여 Plateau top을 갖는 점(spot)을 성장시킬 수 있었으며 이 두가지의 파장의 빛은 파장에 관계없이 성장포화에 유사한 영향을 보인다고 보고하였다. 아울러 레이저빔을 조사한 경우 $350\sim 380^\circ\text{C}$ 의 온도영역에서 주기당 단원자층의 성장포화를 얻을 수 있었으며 이 결과는 레이저를 사용하지 않았을 경우에 성장속도가 온도에 매우 민감한 결과와 대조된다고 보고하였다. Ohno²⁰⁾ 등도 열 ALE의 경우 성장포화를 얻기위한 성장조건이 매우 제한되어 있다는 것을 보고하였다. 350°C 주위의 제한된 온도를 사용하여야 하며 TEGa의 공급량을 일정한 범위에서 조절하여야 성장포화를 얻을 수 있다는 데이터를 보고하였다.

이상과 같이 MOVPE에 일반적으로 사용하는 organometallics인 TMGa과 TEGa과는 다른 DEGaCl을 사용한 ALE연구 보고가 있다. Mori²¹⁾ 등은 100 torr

의 저압 반응로에서 DEGaCl을 III족 반응물로 AsH_3 를 V족 반응물로 사용하여 $450\sim 600^\circ\text{C}$ 의 온도영역에서 성장포화를 얻었으며 525°C 의 온도에서 DEGaCl의 공급량과 $6\sim 15$ 초의 공급시간에 관계없이 주기당 단원자층의 성장속도를 얻을 수 있었다고 보고하였다. Sasaoka²²⁾ 등은 상압 hot wall 반응로에서 DEGaCl과 As를 사용하여 450°C 주위에서 성장포화를 얻을 수 있었다고 보고하였다. 그러나 성장온도가 400°C 에서 475°C 로 증가함에 따라 성장속도가 증가하였으며 475°C 이상의 온도에서는 성장속도가 오히려 감소한다고 보고하였다.

3.3.2 ALE GaAs성장층의 전기적 성질

Nishizawa⁶⁾ 등에 의하여 처음 보고된 GaAs ALE층은 불순물농도가 매우 높은 것으로 측정되었다. 즉, TMGa AsH_3 를 반응물로 사용한 경우 결정층은 p-형 전도도를 나타내며 free carrier의 농도가 $10^{18}\sim 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 가 됨을 보고하였다. 이들은 탄소가 불순물의 주종을 이룬다고 유추하였으며 free carrier의 농도는 TMGa AsH_3 의 농도에 매우 민감하게 변화한다고 보고하였다. 즉, free carrier의 농도는 TMGa의 농도가 증가함에 따라 증가하며 AsH_3 의 농도가 증가함에 따라 감소한다고 보고하였다. 또한 TMGa대신 TEGa를 사용할 경우 free carrier를 10^{16}cm^{-3} 까지 줄일 수 있었다고 보고하였다. ALE 결정층이 P-형 전도도를 가지며 불순물의 농도가 매우 높게 측정된다는 보고는 상당수이다. Tischler²³⁾ 등은 $450\sim 630^\circ\text{C}$ 의 온도에서 성장된 ALE층이 $10^{15}\sim 5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 농도의 P-형 free carrier를 갖는 것으로 측정되었다고 보고하였으며 Ohno¹⁶⁾ 등은 450°C 의 온도에서 성장된 ALE층이 P-형 free carrier를 $5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 갖는다고 보고하였다. DEGaCl과 AsH_3 혹은 As를 사용할 경우에도 p-형 전도도를 갖는 것으로 측정된다는 보고가 있다. Mori²¹⁾ 등은 $450\sim 525^\circ\text{C}$ 의 온도에서 성장된 ALE층이 free carrier $3\times 10^{15}\sim 3.9\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 농도의 P-형 전도도를 갖는다고 보고하였으며 이온도 영역에서는 온도가 증가함에 따라 불순물의 농도가 감소한다고 보고하였다. 600°C 이상의 온도에서는 전도도가 n-형으로 바뀌며 $1.1\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ free carrier 농도와 $224,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 의 mobility를 갖는다고 보고하였다. Sasaoka²²⁾ 등도 성장온도가 증가함에 따라 불순물의 농도가 감소하는 것을 관찰하였다. 아울러 ALE 층은 p-형 전도도를 나타내며 free carrier의 농도는 $5\times 10^{15}\sim 5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, 77K mobility는 $150\sim 2,500\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$

가 됨을 보고하였다. 이상과 같이 ALE 결정층이 탄소에 의하여 p-형 전도도를 갖는다는 대부분의 보고에 반하여 Ozeki²²⁾ 등은 MOVPE로 성장된 결정층과 유사한 높은 mobility를 갖는 n-형 ALE 결정층을 성장시킬 수 있었다는 보고를 하였다. 즉, 이들은 20 torr의 저압 반응로에서 반응물을 Pulsed jet의 형태로 기판에 공급하는 방식을 이용하여 고온에서 성장포화 특징을 잃지 않고 ALE 결정층을 성장시킬 수 있었다. 성장된 ALE 결정은 n-형 전도도를 갖고 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 의 낮은 free carrier 농도를 나타내며 77K mobility $80,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ 에 해당하는 고순도임을 측정할 수 있었고 또한 ALE 층이 고순도임을 얇은폭의 exciton related PL peak으로 부터 제차 확인할 수 있었다. 아울러 Mochizuki²⁴⁾ 등은 고순도의 ALE 층 성장시키기 위하여는 고농도의 TMGa pulse을 짧은 시간에 공급하여야 하며 충분히 많은 양의 AsH_3 를 사용하여야 한다고 보고하였다.

3.3.3 InAs의 ALE

InAs ALE에 대한 연구는 아주 초기단계이다. Tischler²³⁾ 등은 상압반응로에서 triethylindium (TEIn)과 AsH_3 를 사용하여 InAs ALE층을 성장할 수 있었다고 보고하였다. 이들은 rotating susceptor를 사용하여 반응물을 기판에 순차적으로 공급하므로써 1 ML/cycle의 성장속도를 얻을 수 있었다는 결과를 보고 하였다. 그러나 이들의 데이터는 단지 두가지의 TEIn 농도에 대한 결과만을 보임으로써 미흡함을 가지고 있다. Ohno⁴⁰⁾ 등은 trimethylindium (TMIn)과 ALE AsH_3 를 사용하여 300 °C에서 성장포화를 관찰할 수 있었다고 보고하였으며 300 °C이상의 온도에서는 TMIn 공급량에 따라 성장속도가 superlinear하게 증가한다고 보고하였다. Weon^{26), 27)} 등은 상압반응로에서 TMIn과 ALE AsH_3 를 순차적으로 기판에 공급하여 340 °C의 온도에서 성장포화가 일어남을 관찰하였다고 보고하였다. 340 °C보다 높은 온도에서는 포화의 정도가 약하여 TMIn의 양과 함께 성장속도가 서서히 증가함을 관찰할 수 있었다. 한편, 성장포화가 일어나는 온도영역에서의 성장속도는 TMIn공급기간의 길이에 따라 크게 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 한 주기당 같은 양의 TMIn을 공급하여도 많은 양의 TMIn을 짧은 기간동안 공급하는 경우는 많은 양을 오랜기간동안 공급하는 경우에 비하여 작은 성장속도를 보인다고 하였다. 따라서 성장포화가 일어나는 온도영역에서의 성장일지라도 많은

양을 짧은 시간동안 공급하면 주기당 단위자층보다 작은 속도에서 성장포화가 일어난다고 보고하였다. 이들은 이러한 현상이 기판으로 공급되는 III족 반응물의 크기가 분해과정을 거쳐 화합물을 형성하였을 때의 III족 급속원소의 크기보다 크기 때문에 일어나는 steric hindrance 효과에 의한 것이라고 유추하였다.

3.3.4 InP의 ALE

InP의 ALE에 대한 연구도 InAs의 경우와 같이 매우 초보단계이다. Sakuma²⁹⁾ 등은 TMIn과 PH_3 을 사용하여 InP의 ALE를 연구하였는데 이들은 InP의 경우 다른 III-V 화합물의 ALE와는 다른 특이한 성장포화를 보인다고 보고하였다. 즉, 1-12초의 TMIn 공급기간의 영역에서 성장포화는 이들 공급기간의 길고 짧음에 관계없이 0.5 ML/cycle의 성장속도를 보인다고 보고하였다. 이들은 이러한 특이한 성장포화 거동이(100) 면에서의 coverage가 0.5 ML가 되면 안정된 구조를 하기 때문인 것으로 유추하였다. 그러나 PH_3 의 공급기간은 성장속도에 크게 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 즉, PH_3 의 공급기간이 짧을수록 성장속도는 감소하는 것으로 관찰되었다. InP ALE층은 n-형 전도도를 보이며 77K에서 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 낮은 free carrier 농도를 갖는 것으로 관찰되었다. 그러나 Weon²⁷⁾ 및 Chen²⁸⁾ 등의 결과는 InP의 경우도 III-V 화합물 반도체의 ALE의 경우와 마찬가지로 거동을 보이며 Sakuma 등의 보고와 같이 0.5 ML/cycle에서 성장포화가 일어난다는 것에 이견을 보인다. Weon 등은 TMIn과 PH_3 을 사용하여 320 °C에서 0.5ML/cycle의 성장포화를 일으키는 것을 관찰하였다고 보고하였다. 그러나 이들은 이들이 사용한 방법으로서의 InP의 ALE가 실용적이지 아니라는 이유로 실험을 중단한 것이고 TMIn의 공급기간을 변화시킬 경우 1ML/cycle의 성장속도를 얻을 수 있을 것이라고 예상하였다. InP의 경우에는 InAs의 경우에 사용한 AsH_3 과 같은 양의 PH_3 을 공급하는 경우 InAs 성장포화가 일어나는 340 °C에서 morphology가 매우 나빠지며 성장포화도 일어나지 않는 것을 관찰하였다. Morphology를 향상시키기 위하여는 InAs의 경우에 비하여 상당히 많은 양의 PH_3 를 공급하여 주어야 하며 320 °C에서 성장포화를 얻기위하여는 340 °C에서 InAs ALE를 위하여 공급한 AsH_3 의 5배에 해당하는 PH_3 를 공급하여야 한다고 보고하였다. 이와 같이 PH_3 이 다량 필요한 이유는 In층에서의 PH_3 의 열분

해가 AsH_3 의 열분해보다 작거나 P의 결정에의 함유 효율(incorporation efficiency)이 As의 그것보다 작기 때문인 것으로 유추하였다. Chen 등은 330~340 °C에서 1 ML/cycle의 성장포화가 일어나며 420~580 °C의 온도 영역에서의 성장속도가 일정함을 관찰하였다. 그러나 성장온도가 400 °C이하로 감소할 경우 성장속도가 갑자기 감소하는 것을 관찰하였고 따라서 400 °C이하의 온도에서는 결정성장이 표면 반응속도에 의하여 결정된다고(Kinetically limited) 유추하였다. 이때 활성화에너지는 19kcal/mol인 것으로 측정되었다.

3.3.5 InGaAs의 ALE

Tischler²³⁾ 등은 TEIn과 TMGa를 동시에 GaAs기판에 공급하여, 630 °C의 온도에서 몇가지의 In 성분을 갖는 합금에 대하여 1 ML/cycle의 성장포화가 일어남을 관찰하였다. 그러나 In 성분이 10% 이하의 경우를 제외하고는 morphology가 매우 나쁜 결정이 성장된다고 보고하였다. McDermond²⁰⁾ 등은 480 °C의 온도에서 GaAs 및 InP의 기판위에 $(InAs)_1(GaAs)_1$ 형태의 superalloy를 성장시킬 수 있었다고 보고하였다. 이들은 전자현미경의 회절상으로부터 superalloy의 ordered 구조를 확인할 수 있었다고 보고하였다. 이와 유사한 형태의 superalloy의 성장이 Ohno⁴⁰⁾ 등에 의하여 보고되었다. 이들은 350 °C에서 $(InAs)_2(GaAs)_2$ 형태의 superalloy를 (100) InP 기판위에 성장할 수 있었다고 보고 하였다. 그러나 이들이 선택한 온도인 350 °C에서는 GaAs는 성장포화를 일으키나 InAs는 포화를 일으키지 못한다는 것을 관찰하였다. 따라서 InAs의 성장속도는 TMIIn의 양을 조절하므로써 조절하여야만 하였다. 이들은 X-선 회절을 통하여 superalloy가 형성됨을 확인하였으나 이들이 성장한 ALE 결정은 In의 성분이 0.6인 In-rich 결정인 것으로 측정되었다. Hall mobility는 300 K와 77K에서 각각 $3.300cm^2/V \cdot sec$, $1,700cm^2/V \cdot sec$ 인 것으로 측정되었으며 이때 전도도는 n-형이며 free carrier 농도는 각각 $1.3 \times 10^{17} cm^{-3}$, $1.1 \times 10^{17} cm^{-3}$ 인 것으로 관측되었다. Weon²⁶⁾ 등은 TMGa, TMIIn 및 AsH_3 을 사용하여 수평형의 상압반응로에서 (InAs)(GaAs) superalloy의 ALE 성장을 시도하였으나 InAs는 340 °C이상의 온도에서는 성장포화를 일으키지 않고 GaAs는 400 °C이하의 온도에서는 1 ML/cycle의 성장속도를 얻기위하여는 10초 이상의 긴 기간 동안 TMGa를 공급하여야 하는 매우 느린 ALE 반

응을 보이기 때문에 이들 반응물을 사용한 상압반응로에서의 열ALE는 실용적이지 못하다고 결론 지었다.

3.3.6 ALE를 이용한 전자소자의 성장

ALE를 이용하여 전자소자를 성장시키는 시도는 초보단계이나 실용성에 대한 가능성을 보여주는 몇가지의 고무적인 결과가 보고되어 있다. DenBaars⁸⁾ 등은 AlGaAs/GaAs quantum well (QW) 레이저의 cladding layer를 750 °C의 온도에서 MOVPE로 성장시키고 온도를 낮추어 485 °C의 온도에서 600 Å 두께의 active layer를 ALE로 성장시키는 방법을 사용하여 injection 레이저를 성공적으로 만들 수 있었다는 보고를 하였다. 이 뒤를 이어 Bhat³¹⁾ 등은 ALE층이 일반적으로 고농도의 탄소를 함유하는 p- 전도도를 갖는 결정층을 형성한다는 것에 착안하여 heterojunction bipolar transistor (HBT)의 베이스를 ALE로 성장하였다. 700 °C에서 GaAs 콜렉터층을 성장한후 기판온도를 550 °C로 낮추어 p-형 free carrier 농도가 $2 \times 10^{18} cm^{-3}$ 되는 2000 Å 두께의 베이스층을 ALE로 성장하였다. 이 때 TMGa과 AsH_3 을 반응물로 사용하였으며 성장된 HBT는 1,300 A/cm²의 콜렉터 전류밀도에서 100이상의 전류 gain을 보였다. 한편 Chen³²⁾ 등은 active 층을 LALE로 성장하여 고품질의 double heterostructure 및 QW 레이저를 얻을 수 있었다고 보고하였다. 이들은 Ar 레이저의 514.5 nm의 파장의 빛을 TMGa 공급기간에 조사하여 상온에서 p-형 free carrier 농도 $2 \times 10^{17} - 3 \times 10^{18}$ 를 갖는 ALE층을 성장시킬 수 있었고 이 방법을 이용하여 threshold 전류밀도 650 A/cm²를 갖는 QW 레이저를 만들 수 있었다.

5. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 ALE를 이용한 결정성장은 초기단계를 지나 실용적인 성장법으로의 사용 가능성을 보이는 단계로 발전되어 왔다. 초기단계의 열ALE의 데이터가 보이던 약한 성장포화 (soft growth saturation), 성장포화거동의 온도에 대한 민감성, 결정층에의 고농도의 탄소함유등의 문제점들은 ALE 성장의 반응경로에 대한 이해가 진척됨에 따라 해결되어 왔다. Ozeki¹²⁾ 등이 보이는 강한 성장포화의 데이터와 Ozeki¹²⁾ Mochizuki²⁴⁾ 등이 얻을 수 있었던 고순도의 GaAs ALE층에 대한 보고는 ALE 결정

의 반응경로에 대한 이해가 상당히 진척되었으며 이상적 ALE가 제시하는 성장거동과 MOVPE로 성장된 결정층과 같은 고순도의 결정층을 실제로 얻을 수 있다는 것을 보여준다. 아울러 DenBaars,⁸⁾ Bhat⁹⁾ 및 Chen²²⁾ 등에 의하여 보고된 실용적 전자소자 제작에 의 ALE의 활용도도 많은 가능성을 보인다. 그러나 ALE에 대한 연구는 전통적인 MOVPE와 같은 일반 성장법에 비하여 초보단계이고 더욱 많은 연구가 진행되어야 한다. 이와 함께 ALE로 성장된 전자소자가 전통적인 성장법으로 성장된 전자소자보다 높은 성능을 보이거나 전통적 방법으로는 얻을 수 없는 기능을 ALE를 통하여 얻을 수 있으며 또한 이 방법으로 성장된 전자소자의 기능이 전통적 방법으로 성장된 전자소자에 뒤떨어지지 않는다는 것을 증명하여야 새로운 성장법으로의 ALE의 존재필요성을 가질 수 있다. ALE의 발전은 기본적으로 ALE 반응경로를 보다 이해함으로써 얻을 수 있다. 성장포화가 일어나는 과정, 불순물을 제거하는 방법등을 이해함으로써 ALE를 보다 실용적인 성장법으로 발전시킬 수 있을 것이다. 현재까지 이해되어 있는 ALE 반응 경로에 대하여는 4면에서 다루도록 한다.

참 고 문 헌

- Suntola and J. Antson, Finnish Patent No. 523 59 (1974) ; T. Suntola and J. Antson, Us Patent No. 4058430 (1977) ; T. Suntola, A. Parker, and S. Lindfors, US Patent No. 4389973 (1983)
- J. Nishizawa, J. Jpn. Inst. Metals, 25 (1961), P 149
- J. Nishizawa and H. Nihira, J. Crystal Growth 45 (1987), P82
- J. Nishizawa, Y. Kokubun, H. Shimawaki, and M. Koike, J. Electrochem. Soc. 132 (1985), P19 39
- For extensive references see T. Suntola and J. Hyvarinen, Ann. Rev. Mater. Sci. 15 (1985), P 177 ; C. H. L. Goodman and M. V. Pessa, J. Appl. Phys. 60 (1986), R65
- J. Nishizawa, H. Abe, and T. Kurabayashi, J. Electrochem. Soc. 132 (1985), p1197
- M. A. Tischler and S. M. Bedair, Appl. Phys. Lett. 48 (1986), p1681
- S. P. DenBaars, C. A. Baylor, A. Hariz, and P. D. Dapkus, Appl. Phys. Lett. 51 (1987), p1530
- S. P. DenBaars, A. Hariz, C. Baylor, B. Y. Maa, Q. Chen, and P. D. Dapkus, Mat. Res. Soc. Proc. 102 (1988), p527
- H. Ohno, S. Ohtsuka, A. Ohuchi, T. Matsubara, and H. Hasegawa, J. Crystal Growth 93 (1988), p342
- M. Ozeki, K. Nochizuki, N. Ohtsuka, and K. Kodama, J. Vac. Sci. Technol. B5 (1987), 1184
- M. Ozeki, K. Mochizuki, N. Ohtsuka, and K. Kodama, Appl. Phys. Lett. 53 (1988), p1509
- J. Nishizawa, H. Abe, T. Kurabayashi, and N. Sakurai, J. Vac. Sci. Technol. A4 (1986), p706
- A. Doik, Y. Aoyagi, and S. Namba, Appl. Phys. Lett. 48 (1986), p1787
- Y. Aoyagi, A. Doi, S. Iwai, and Namba, J. Vac. Sci. Technol. B5 (1987), p1460
- N. H. karam, H. Liu, I. Yoshida, and S. M. Bedair, Appl. Phys. Lett. 52 (1988), p1144
- S. P. DenBaars, P. D. Dapkus, J. S. Osinski, M. Zandian, C. A. Baylor, and K. M. Dzirko, Inst. Phys. Conf. Ser. No 96 : Chapter 3, p89-94 : Paper presented at Int. Symp. GaAs and Related Compounds, Atlanta, Georgia, 1988
- J. Nishizawa, T. Kurabayashi, H. Abe, and N. Sakurai, J. Electrochem. Soc. 134 (1987), p945
- T. Meguro, T. Suzuki, K. Ozaki, Y. Okano, A. Hirata, Y. Yamamoto, S. Iwai, Y. Aoyagi, and S. Namba, J. Crystal Growth 93 (1988), p190
- H. Ohno, S. Ohtsuka, H. Ishii, Y. Matsubara, and H. Hasegawa, Appl. Phys. Lett. 54 (1989), p20 00
- K. Mori, M. Yoshida, A. Usui, and H. Terao, Appl. Phys. Lett. 52 (1988), p27
- C. Sasaoka, M. Yoshida, and A. Usui, Jpn. J. Appl. Phys. 27 (1988), L490
- M. A. Tischler and S. M. Bedair, J. Crystal Growth 77 (1986), p89
- K. Mochizuki, M. Ozeki, K. Kodama, and N. Ohtsuka, J. Crystal Growth 93 (1988), p557
- Weon G. Jeong, E. P. Menu, and P. D. Dapkus, Appl. Phys. Lett. 55 (1989), p244
- Weon G. Jeong, E. P. Menu, and P. D. Dapkus,

- Mat Res. Soc. Symp. Proc. vol. 145 (1989), p 163
27. Weon G. Jeong, E. P. Menu, and P. D. Dapkus, SPIE Proc. of First Int. Con. on Indium Phosphide and Relat. Mat. for Adv. Electron. and Opt. Dev., vol 1144 (1989), p86
28. Y. Sakuma, K. Kodama, and M. Ozeki, Jpn. J. Appl. Ohys., 27 (1988), L2189
29. W. K. Chen, J. C. Chen, L. Anthony, and P. L. Liu, Appl. Phys. Lett. 55 (1989), p987
30. B. T. MaDermont, N. A. El-Masry, M. A. Tischler, and S. M. Bedair, Appl. Phys. Lett. 51 (1987), p1830
31. R. Bhat, J. R. Hayes, E. Colas, and R. Esagui, IEEE Electron. Dev. vol. 9 (1988), p442
32. Q. Chen, J. S. Osinski, and P. D. Dapkus, Appl. Phys. Lett. vol. 57 (1990) p1437