

砷化镓及其应用

國防工業出版社

内 容 简 介

本书译自日刊《エレクトロニクス》(电子学)1971年第5、6两期中“GaAs とその応用”一文。书中首先介绍了砷化镓单晶和外延生长技术在近几年所取得的进展,并系统地阐述了砷化镓在微波器件、光电器件以及微波集成电路等方面极其广泛的应用。

本书可供从事砷化镓半导体材料及其器件研制和生产的工人、技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

砷化镓及其应用

峨嵋半导体材料研究所 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张4³/₄ 98千字

1975年12月第一版 1975年12月第一次印刷 印数: 0,001—7,700册

统一书号: 15034·1456 定价: 0.50元

目 录

一、砷化镓单晶的进展	7
1.1 GaAs 单晶生长技术概述	8
1.2 大直径单晶的制造工艺	14
二、砷化镓外延生长的进展	24
2.1 外延生长的必要性	24
2.2 液相外延	26
2.3 气相外延	33
三、砷化镓场效应晶体管及其应用	40
3.1 制造技术	41
3.2 肖特基栅型FET的结构设计	42
3.3 材料方面的比较	45
3.4 应用	47
四、砷化镓微波固体器件	51
4.1 GaAs 微波固体振荡器件的出现	51
4.2 各种 GaAs 微波二极管及其应用	57
五、砷化镓微波集成电路	67
5.1 GaAs 微波集成电路的出现	67
5.2 GaAs 微波集成电路的制造技术	70
5.3 GaAs 微波集成电路的应用	75
六、耿氏二极管及其应用	79
6.1 耿氏二极管的出现及其现状	79
6.2 耿氏二极管的特点	82

6.3 耿氏振荡器的应用	86
七、发光二极管	93
7.1 发光二极管的原理和特性	94
7.2 发光二极管的种类	97
7.3 今后的动向	103
八、砷化镓半导体激光器	107
8.1 GaAs 半导体激光器的出现	107
8.2 GaAs 半导体激光器的功能	116
8.3 GaAs 半导体激光器的应用及今后的发展	119
九、砷化镓体效应的新应用	122
9.1 放大器件	123
9.2 函数发生器和模拟-数字转换器	130
9.3 成象	132
9.4 逻辑器件	133
9.5 换能器	138
十、展望耿氏二极管和碰撞雪崩渡越时间二极管	142
10.1 电学特性	143
10.2 使用条件	146
10.3 根据用途判断两者的优劣	148
10.4 结论	151

砷化镓及其应用

峨嵋半导体材料研究所 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书译自日刊《エレクトロニクス》(电子学)1971年第5、6两期中“GaAs とその応用”一文。书中首先介绍了砷化镓单晶和外延生长技术在近几年所取得的进展,并系统地阐述了砷化镓在微波器件、光电器件以及微波集成电路等方面极其广泛的应用。

本书可供从事砷化镓半导体材料及其器件研制和生产的工人、技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

砷化镓及其应用

峨嵋半导体材料研究所 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张4³/₄ 98千字

1975年12月第一版 1975年12月第一次印刷 印数: 0,001—7,700册

统一书号: 15034·1456 定价: 0.50元

译者序

人类对半导体现象的最初发现，是1833年法拉第发现的硫化银的电阻与普通金属相反，它随着温度的升高而降低。然而，对化合物半导体的发展具有巨大推动作用的，可以说是锗晶体管（1948年）和硅 $p-n$ 晶体管（1949年）的发明。因为锗、硅晶体的出现，激发起人们去探求性能更为优良的半导体材料。不久韦尔克（Welker）于1952年发现Ⅲ-V族化合物和锗、硅一样，是一类具有半导体性质的物质。接着对它们的电学性质进行测定，发现尤以砷化镓（GaAs）具有许多优异特性，如电子迁移率大、禁带宽度大、能带结构是直接跃迁型和呈现负阻效应等。这样，在短短的二十几年内，人们对GaAs的制备方法进行了大量研究，不但单晶技术日趋完善，而且还发展了外延生长技术。随着GaAs质量的不断提高和新的物理现象的发现，其应用范围也愈益扩大，现在GaAs器件已在微波通讯、激光和光显示以及集成电路等领域获得了广泛的应用。

我国的半导体工业在党的社会主义建设总路线和自力更生方针的指引下，已经取得了飞速的发展。现在半导体器件已在国民经济的各个领域获得了广泛的应用。

我们遵照毛主席“洋为中用”的教导，翻译了《砷化镓及其应用》一书，以供读者了解国外砷化镓材料及其器件的发展概况。但是，由于书中作者用资产阶级的观点看待科学

技术的发展，夸大了少数“专家”的作用，无视广大劳动人民的发明创造，所以希望读者参阅本书时，牢记毛主席关于“批判地吸收外国文化”的教导，对本书内容批判地参考。

目 录

一、砷化镓单晶的进展	7
1.1 GaAs 单晶生长技术概述	8
1.2 大直径单晶的制造工艺	14
二、砷化镓外延生长的进展	24
2.1 外延生长的必要性	24
2.2 液相外延	26
2.3 气相外延	33
三、砷化镓场效应晶体管及其应用	40
3.1 制造技术	41
3.2 肖特基栅型FET的结构设计	42
3.3 材料方面的比较	45
3.4 应用	47
四、砷化镓微波固体器件	51
4.1 GaAs 微波固体振荡器件的出现	51
4.2 各种 GaAs 微波二极管及其应用	57
五、砷化镓微波集成电路	67
5.1 GaAs 微波集成电路的出现	67
5.2 GaAs 微波集成电路的制造技术	70
5.3 GaAs 微波集成电路的应用	75
六、耿氏二极管及其应用	79
6.1 耿氏二极管的出现及其现状	79
6.2 耿氏二极管的特点	82

6.3 耿氏振荡器的应用	86
七、发光二极管	93
7.1 发光二极管的原理和特性	94
7.2 发光二极管的种类	97
7.3 今后的动向	103
八、砷化镓半导体激光器	107
8.1 GaAs 半导体激光器的出现	107
8.2 GaAs 半导体激光器的功能	116
8.3 GaAs 半导体激光器的应用及今后的发展	119
九、砷化镓体效应的新应用	122
9.1 放大器件	123
9.2 函数发生器和模拟-数字转换器	130
9.3 成象	132
9.4 逻辑器件	133
9.5 换能器	138
十、展望耿氏二极管和碰撞雪崩渡越时间二极管	142
10.1 电学特性	143
10.2 使用条件	146
10.3 根据用途判断两者的优劣	148
10.4 结论	151

一、砷化镓单晶的进展

铃木 隆 赤井慎一

如果把 GaAs 晶体这一专题分作单晶和外延片来考虑，那么，作为单晶，最重要的问题，就是用最低的成本制备出最适合于各种用途的晶体。

在化合物半导体中，GaAs 有着许多优良的物理特性。从微波、毫米波直到光电器件，其应用非常广泛。GaAs 除单独应用之外，还可用作 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ 等混合晶体的衬底；此外，也可用作 ZnSe 等非 III-V 族化合物半导体的衬底以及其它用途。但是，GaAs 单晶和 Ge、Si 单晶比较，其晶体尺寸、完整性、均匀性以及单晶成本等，尚有许多不足之处。特别是成为一切出发点的衬底单晶，还存在不少问题。这使我们深刻感到在单晶制备方面的重大责任。为了尽快地使 GaAs 接近于 Si、Ge 的水平，进行了刻苦的研究，这就是 GaAs 目前的情况。本文拟从 GaAs 单晶制作这一角度出发，来叙述 GaAs 衬底存在的问题。我们认为，这或多或少会对促进 GaAs 单晶的进展有所帮助。

GaAs 单晶的制造一般可以分为如下两个方面：

- (1) 大直径单晶制造技术（包括晶片加工技术）；
- (2) 外延片的批量生产技术。

本文以（1）为重点。然而，上述两个问题是有密切联系的，所以不能撇开外延片的制造来专门叙述大型单晶的制

造。因此，我们首先简述 GaAs 单晶的生长技术，从中来概括单晶和外延生长技术的关系；其次，论述 GaAs 单晶生长的两项重要技术——舟皿生长法和直拉法的特征、存在的问题以及将来的发展方向。

1.1 GaAs 单晶生长技术概述

要生长 GaAs 晶体，首先必须明了 Ga-As 系统的基本相图。Ga-As 系统相图，即表示系统的蒸气分压、温度和组分关系的 $P-T-x$ 相图，早在十多年前，就用实验方法求得⁽²⁾并逐步精密化了。图 1-1 和图 1-2 是最新的精确相图⁽³⁾。图 1-1

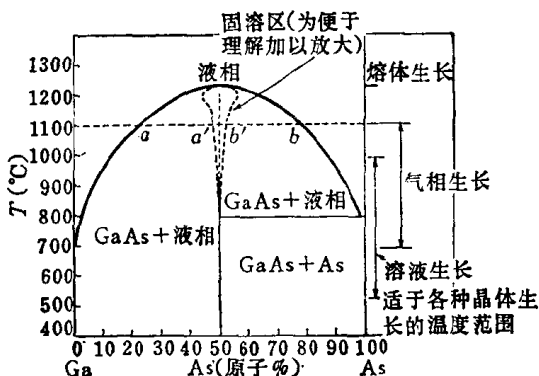


图 1-1 Ga-As 系统的 $T-x$ 图⁽³⁾

并不是普通金属和合金相图之类的等压截面图。例如，如果图 1-1 中的液相 a 和固相 a' 达到平衡，这时，各种蒸气的分压，即为图 1-2 中的 a, a' 值；而图 1-1 中的液相 b 和固相 b' 达到平衡时，和 a, a' 不同的 b, b' 的值就给出各种蒸气的分压。图 1-1 中夸张表示的固溶区也是一个重要的因素，但遗憾的是还不知道它的详细情况。用熔体生长法所制

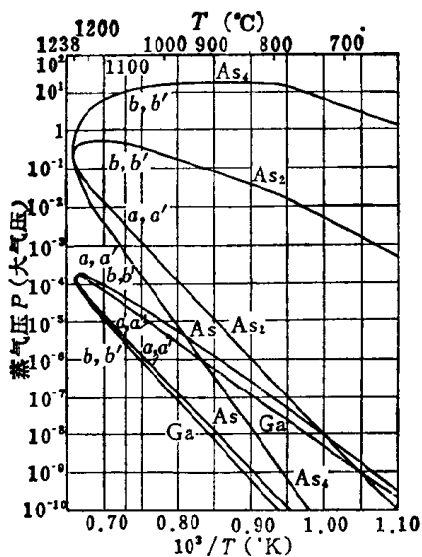


图1-2 Ga-As系统的P-T图⁽³⁾

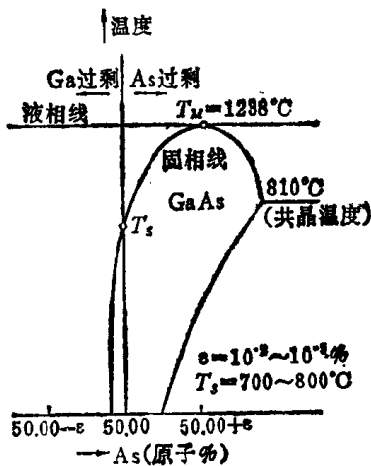


图1-3 Ga-As系统的固相线⁽⁴⁾

得的 GaAs 单晶,一般因含有许多 Ga 的空位,所以也有人主张 GaAs 的最高熔点的组成,含 As 量比 50% 高 $10^{-2} \sim 10^{-3} \%$ 左右⁽⁴⁾。图 1-3 就是其例。

GaAs 单晶生长的困难,集中表现在图 1-1 和图 1-2 上。Ge、Si 在熔点时的蒸气压分别约为 10^{-9} 和 10^{-6} 大气压。由图 1-2 可以看出:在 GaAs 熔点处,As 的蒸气压约为 1 大气压,Ga 的蒸气压约为 10^{-4} 大气压。因而,应通过防止 As 的蒸发损失和控制 As 的蒸气压来控制 GaAs 不偏离其化学当量比。为此,在几十年里曾发展了多种晶体生长方法⁽⁵⁾,而表 1-1 列举的只是现在工业上主要采用的 GaAs 单晶生长技术。在舟皿生长法中,又分为水平布里奇曼法 (HB)^①、温度梯度法 (GF)^②、区熔法 (ZM^③、ZL^④) 等;在直拉法

表1-1 GaAs晶体生长技术

技 术 种 类		优 点	缺 点
大直径单晶制造技术	舟皿生长法	容易控制As的蒸气压	由舟引起污染 晶向不易整齐
	直拉法	晶向整齐	控制蒸气压困难 LEP法需要多晶
外延片制造技术	气相外延	纯度高	不易大量生产 难于控制晶格缺陷
	液相外延	纯度高	大量生产困难 厚度控制困难

- ① Horizontal Bridgman Technique
- ② Gradient Freezing Technique
- ③ Zone Melting Technique
- ④ Zone Leveling Technique

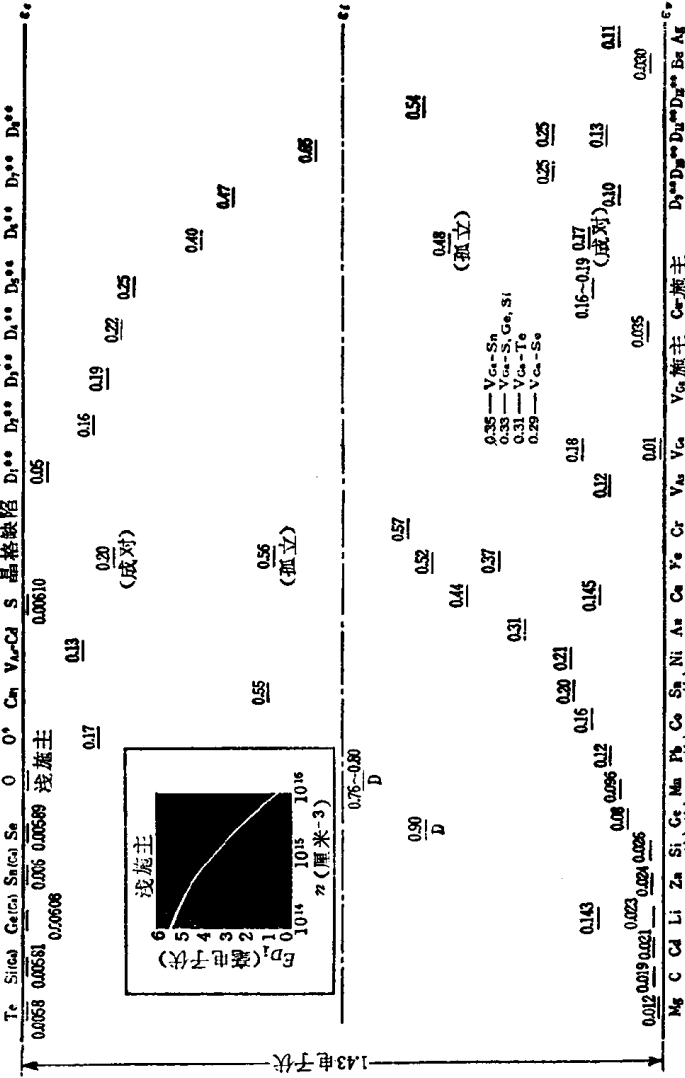
方面，除液态密封法(LEP)●之外，还有磁耦合法(MCZ)●等。上述方法各有其优缺点。如果考虑到批量生产、掺杂控制等方面，一般认为 HB 法、ZM 法和 ZL 法以及 LEP 法最为重要。在外延片制造技术方面，气相外延较适于批量生产⁽²⁾。此外由图 1-3 可以看出，由于液相外延是从 Ga 溶液中生长的，所以在晶格缺陷控制方面是比较好的。

对于 GaAs 单晶生长技术来说，其重要因素除了生长大直径优质单晶以外，还有掺杂控制问题。这个问题无论是作为衬底的单晶还是外延片来说，都是一个十分重要的问题。要进行掺杂控制，首先需要明了 GaAs 中各种杂质及缺陷的行为。图 1-4 表示 GaAs 中各种杂质的能级。

图中所引用的数据是 1968 年发表的⁽⁶⁾，并从以后的报告中进行了修正或补充，其中也有和原来研究者的看法不一致的地方，但我们认为该图比较方便，所以冒昧地推荐给读者。实际上，晶格缺陷以及晶格缺陷与杂质的复合体，可以形成能量范围相当宽的能级。此外，在图 1-4 中，禁带中央 (ϵ_i 能级) 上部表示施主，下部表示受主；但是，尽管在 ϵ_i 能级以下，用 D 表示的仍是施主。O (氧) 不仅在 Si 单晶中表现出一种奇妙的行为，而且在 GaAs 中也起着一种奇妙的作用。例如从 800°C 左右起，用溶液生长法制备掺氧 GaAs 单晶时，氧变成浅施主；而在高温下，让它从熔体中生长时，一般则形成深施主。这一点，如果按图 1-3 来理解，也许可以这样解释：在低温下，氧原子容易进入 As 空位的位置，而在高温下，氧原子则容易进入 Ga 空位的位置。此外，图

● Liquid Encapsulation Pulling Technique

● Magnetic Czochralski Technique



* : 结合在(100)带上 $\bullet\bullet$: 向无统一的想法

图1-4 GaAs中的杂质能级 (300 °K)

中 D_0 的缺陷也许是由氧引起的。0.17 电子伏的能级虽可能是氧引起的，但也可能是晶格缺陷。

考虑到以上诸因素，晶体生长技术的目标应是：

- (1) 生长的晶体污染应少；
- (2) 能有效地控制有用杂质的掺杂；
- (3) 尽量减少各种晶格缺陷。

因此，单晶和外延片的制造技术是有密切联系的，表 1-2 按主要用途列出了 GaAs 单晶的主要类别。这样，GaAs 单晶的规格就随用途而异。随着单晶生长技术以及工作层生长技术的进展，其规格有继续变化的趋势。对于单晶来说，

表 1-2 GaAs 单晶的种类

主要用途	工作层		衬底		
	生长方法	种类	种类	掺杂剂	载流子浓度 (厘米 ⁻³)
微波器件	VPE	n-GaAs	n ⁺ -GaAs i-GaAs	Si, Sn, Te Cr, O	10 ¹⁷ ~10 ¹⁸ ≈10 ⁷
	LPE	n-GaAs	n ⁺ -GaAs i-GaAs	Si, Sn, Te Cr, O	10 ¹⁷ ~10 ¹⁸ ≈10 ⁷
红外发光器件	LPE	n 或 p-GaAs	n ⁺ 或p ⁺ -GaAs	Si	10 ¹⁷ ~10 ¹⁸
				Zn	10 ¹⁷ ~10 ¹⁹
激光器	扩散①	p-GaAs	n-GaAs	Te	10 ¹⁸ ~10 ¹⁸
	LPE	Ga _{1-x} Al _x As 及 GaAs	n ⁺ -GaAs	Si, Sn, Te	≈10 ¹⁸
可见光发光器件	VPE	n-GaAs _{1-x} P _x	n ⁺ -GaAs	Si, Sn, Te	10 ¹⁷ ~10 ¹⁸
	LPE	n-Ga _{1-x} Al _x As	n ⁺ -GaAs	Si, Sn, Te	10 ¹⁷ ~10 ¹⁸
	VPE	n-GaP	n ⁺ -GaAs	Si, Sn, Te	10 ¹⁷ ~10 ¹⁸
红外调制器件	加工①		i-GaAs	Cr, O	≈10 ⁷

① 衬底本身形成工作层。