

砷化镓半导体材料

(譯文集)

金 冶 編 譯

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书共选譯了美、英、苏、西德四国期刊上发表的以及各国半导体会議上有关砷化鎢方面的論文报告共 74 篇。为了查閱方便起見,按論文性质分为五个部分,分別介紹:总論,制备(合成、提純及晶体生长),腐蝕和晶体缺陷,化学性质和物理性质以及热处理、杂质扩散及其行为。

本书可供半导体冶金領域及其有关的科学工作者、工程技术人员和师生参考。

砷化鎢半导体材料

(譯文集)

金 冶 編 譯

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

商务印书館上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印張 18 4/32 插頁 1 排版字數 480,000

1965 年 5 月第 1 版 1965 年 5 月第 1 次印刷

印数 1-1,700

統一書号 13119·639 定价(科七) 3.00 元

前 言

自从 1952 年关于 III-V 族化合物的制备及其重要半导体性质首次报导以来,引起了各国有关学者的广泛注意。据不完全统计,到目前为止仅仅公开发表的论文报告就在 1500 篇以上,其中砷化镓(GaAs)材料,由于它具有比硅更大的禁带宽度(1.40 电子伏)和比锗更高的电子迁移率(~ 11000 厘米²/伏·秒),因而砷化镓作为半导体器件材料,无论在高温性能或高频行为两方面都有可能更胜于硅和锗。不仅如此,更由于砷化镓的某些特性,它在高压操作以及抗辐射能力等方面也是非常突出的,后者同砷化镓相对大的原子量以及短的载流子寿命有关。然而,目前由于 GaAs 材料在制备工艺上还存在着一定的困难,以致上述一些优点尚未能最充分地显示出来,它在各种器件中的广泛应用,也还没有象现今的锗和硅那样大规模的全面开展。但是,已有的数据足以表明,砷化镓是目前最好的隧道二极管和参量二极管材料;也有迹象表明,它是最佳的太阳能电池材料。最近一年来,在受激发射方面所进行的一系列试验研究,更进一步表明砷化镓也不失为一种优良的光激励器材料,其变电能为光能的效率高达 85%,并且已初步成功地将电视图象传递了 30 哩。此外, GaAs 莱塞二极管在其他通信方面以及计算机和雷达(特别是用于外层空间的雷达)上,估计也会有重要的应用。更有进者,不久前还在此基础上发展了一种用光子束耦合的新型半导体三极管——光束半导体三极管。当然目前这种新型半导体三极管尚处于摸索试制阶段,但是据说它甚至有可能比现有的半导体三极管领域更有发展的前途。

因此,毫无疑问,随着砷化镓材料制备、提纯、晶体生长技术以及器件工艺和设计等方面的进一步发展和改善,它的应用范围以

及在整个半导体材料領域中的重要性,将愈益充分地显示出来。最近若干年来,国外在砷化镓材料方面的研究进展非常迅速,因此为了使讀者了解有关砷化镓材料各方面的一些知識,并反映最近在国际上所取得的成就及其研究动向,选編了本譯文集。

全集一共选譯了美、英、苏、西德等四国期刊上发表的以及各国半导体会議上有关砷化镓方面的論文报告共 74 篇。可以这样說,从早期发表的一直到本书付印前有关砷化镓方面的主要文献,除“半导体快报”上已有之外几乎都已收入。为了使讀者查閱方便起見,謹将这些論文或报告按其内容,大致上划分为总論,制备(合成、提純及晶体生长),腐蝕和晶体缺陷,化学性质和物理性质以及热处理、杂质扩散及其行为等五个部分。

第 I 部分总論中,“GaAs 和 InP 材料的研究”一文全面論述了砷化镓在半导体材料領域中的重要性,包括砷化镓的各种合成、提純和晶体生长方法(包括元素提純),晶体的完整性,杂质的行为以及热效应等。文中还包括了 InP 材料的一部分研究,但非重点。

第 II 部分为材料的制备,包括合成、提純和各种晶体生长方法以及相关的論文共 16 篇,其中第 2~8 篇分別介紹了水平区域熔炼、浮区提純以及各种拉晶设备及其操作;第 9~12 篇則着重叙述同晶体合成、生长有关的问题,例如沾染原因、坩埚材料问题、晶体极性对生长的影响等。又鉴于最近汽相外延生长的技术发展极为迅速,因此在这里也选譯了 5 篇(第 13~17 篇)作为代表。

第 III 部分“腐蝕和晶体缺陷”介紹了各种腐蝕剂及其腐蝕工艺、位錯坑及晶面的显示以及极性效应等,共 5 篇文章。

第 IV 部分关于砷化镓材料的各种化学性质和物理性质,所收入的論文最多。前 4 篇(第 23~26 篇)介紹砷化镓材料的一般性质,例如有关 Ga-As 等体系的压力-温度-成分(即 p - T - x)相图,室温及高温氧化性能,熔点区及液态的电导率和粘度等。其次介紹有关光吸收方面的論文 6 篇(第 27~32 篇),电学性质 10 篇(第 33~42 篇),后者包括霍耳系数和电导率、杂带、迁移率及其散射机理以及相关的能斯脱-厄廷好森效应等研究。而第 43 和 44 两

篇則着重討論砷化鎵的能帶結構和電子輸運,其中第 43 篇也可以說是上述有關光學、電學性質研究方面共 15 篇論文的一個小結。再次,第 45~51 篇則專門論述高阻或半絕緣砷化鎵 ($\geq 10^6$ 歐·厘米)晶體的製備、電學、光學性質以及產生高阻的原因分析,包括某些作者在絕緣體研究方面常用的光電子分析方法在內。

載流子壽命及其复合过程也是半导体材料的一个重要参量,但由于砷化鎵材料的壽命極其短促 ($10^{-8} \sim 10^{-9}$ 秒或以下),故在測試方法上比較困難,在這裡共選譯了有關壽命測試方法及复合性質方面的研究報告 5 篇(第 52~56 篇),包括兩篇复合輻射在內。

最後,第 V 部分關於 GaAs 材料的热處理、輻射效應、雜質擴散及其行為一共 18 篇,分別介紹了 GaAs 中 Zn、Cd、Cu 的擴散研究(第 57~60 篇),熱處理和輻射退火效應(第 61~65 篇)以及 Cu、Mg、Li、Si、Ge、Se、Mn 等個別雜質的電學行為、雜質的有效分配係數及其測量方法等(第 66~74 篇)。

以上只是有關本譯文集內容的一個概括性介紹。至於另外一些比較次要的,或者雖屬重要,但因限於時間、篇幅或者其他原因而未能收入本譯文集的各種文獻,我們則在書末按本文集的分類方法另附補充參考文獻共 327 條,以供讀者進一步查閱。此外還在書末的附表內列出了砷化鎵的一些主要性質以及它同鎘、硅、碳化硅的比較。

全書所用的一些專用名詞,原則上尽可能以中國科學院名詞編譯室業已公布的為準。對個別疑難名詞則一律在譯文後面附注原文,以免引起誤解。人名、地名除常見者外一概不譯。

最後希望本譯文集能對我國半導體工作者了解有關砷化鎵半導體材料的研究情況有所幫助。但是,由於譯者各方面的水平都很有限,加上時間倉促,因此無論在論文的選取方面,還是譯文本身的質量乃至文字表達方面,均可能存在不少的謬誤或者尚欠妥當,為此熱忱地希望讀者隨時予以斧正。

譯 者 1963 年除夕

目 录

前 言

I. 总論	1
1. GaAs 和 InP 材料的研究	1
II. 制备——合成、提純及晶体生长	45
2. InP 和 GaAs 的制备和电学性质	45
3. 砷化镓单晶的制备及其性质	52
4. 砷化镓浮区提純設備	59
5. InAs 单晶和 GaAs 单晶的制备	68
6. 生长砷化镓单晶的設備	71
7. 含挥发組元材料的注射筒式单晶炉	73
8. 砷化镓拉晶炉	75
9. 砷化镓晶体生长中沾染的原因	84
10. 論高純度砷化镓的制备	97
11. 合成砷化镓用的 AlN 容器	101
12. GaAs 晶体在(111)极性方向的生长	109
13. 用化学方法制备 InAs, InP, GaAs 及 GaP	111
14. 汽相生长的砷化镓晶体	114
15. 从汽相中生长 GaP 和 GaAs 晶体的方法	118
16. 在 Ge 单晶上外延汽相生长 GaAs	125
17. 外延砷化镓的生长速率	127
III. 腐蝕和晶体缺陷	129
18. 砷化镓的腐蝕試驗	129
19. 砷化镓中的腐蝕坑	137
20. 用腐蝕法显示砷化镓(111)面上的位錯	141
21. 一种适用于 III-V 族半导体的抛光腐蝕剂	143

22. 砷化镓单晶的极性	145
IV. 化学性质和物理性质	149
23. In-As, Ga-As 和 In-P 体系的 P - T - x 相图	149
24. 金属间化合物的氧化性——III:III-V 族化合物的室温氧化性	161
25. GaAs 的热氧化性	168
26. 砷化镓和砷化铝在熔化区和液态时某些物理性质的研究	170
27. 砷化镓的某些性质	176
28. 砷化镓中的价带内跃迁	180
29. n 型砷化镓中的红外吸收和电子有效质量	183
30. GaAs 的光吸收限及其对电场的依赖关系	191
31. 简并的 p 型 GaAs 的吸收限	198
32. 砷化镓的晶格吸收	204
33. 砷化镓的一些电学物理性质	212
34. GaAs 低温电学性质	221
35. p 型和 n 型砷化镓晶体中的杂带	234
36. n 型砷化镓杂带中的导电	241
37. n 型砷化镓的电学性质	244
38. 强简并砷化镓的载流子散射	259
39. 砷化镓中的能斯脱-厄廷好森效应	267
40. 砷化镓中的光谱能量和载流子散射	271
41. n 型 GaAs 中的能斯脱效应	283
42. GaAs 的高温霍耳系数	287
43. GaAs 的能带结构和电子输运	290
44. 砷化镓中的能带	317
45. 砷化镓半绝缘体	327
46. 半绝缘 GaAs 的性质	331
47. 高阻 GaAs 的制备和性质	339
48. 高阻晶体的光电子分析 (a) GaAs (b) Sb_2S_3	350
49. 扩散铜补偿高阻砷化镓的性质	366
50. 半绝缘砷化镓中的光电导性	394
51. 半绝缘砷化镓中的 Demer 效应和光电磁效应	402
52. GaAs 中的少数载流子寿命	406
53. GaAs 中的载流子寿命	414

54. GaAs 中的直接复合和半导体三极管設計中的一些推論	419
55. 由砷化鎵发射出的复合輻射	428
56. GaAs 中的复合輻射	431
V. 热处理、杂质扩散及其行为	436
57. 鋅在砷化鎵中的扩散	436
58. 鋅和鎘在砷化鎵中的扩散	446
59. 銅在砷化鎵中的扩散, 溶解度和电学行为	454
60. 用銅扩散制备 <i>p</i> 型 GaAs 的性质	462
61. 砷化鎵中銅的沉积	471
62. 砷化鎵的热处理	473
63. <i>n</i> 型 GaAs 中的热转变	479
64. 用輻射能对 <i>n</i> 型 GaAs 进行热处理	481
65. <i>n</i> 型 GaAs 的輻射效应及退火	485
66. <i>p</i> 型 GaAs 中的杂质能級和迁移率	489
67. <i>p</i> 型 GaAs 中杂质的測量	493
68. 砷化鎵中鎂电离能的測量	511
69. 砷化鎵中 Li 的电学性质	515
70. GaAs 中錳的行为	519
71. 硅在砷化鎵中的影响	522
72. 砷化鎵中鎘的行为	525
73. 砷化鎵中硒的行为	528
74. 砷化鎵中杂质的分配系数	536
附录 砷化鎵的主要性质和腐蝕剂	547
补充参考文献	554

I. 总 論

1. GaAs 和 InP 材料的研究[†]

L. R. Weisberg, F. D. Rosi, P. G. Herkart

1. 引 言

近年来,关于半导体材料的研究,已从称做金属間化合物的一大类物质着手。在以共价鍵为主的那些半导体中,少量离子特性的存在,对諸如载流子迁移率和禁帶寬度这些重要物理性质产生巨大的影响。因此,这些材料能够比单质半导体鍺、硅提供范围更广的电学性质,而这应当允許設計出更加灵巧和范围更广的半导体三极管之类的器件。关于这点,重要的是所需材料既能用来扩展半导体器件的高温本領,超过硅所赋予的极限,而又不牺牲堪与鍺制器件相比的高頻行为。Welker^[1] 和更近时的 Jenny^[2] 对二元金属間化合物的試探性研究清楚地表明,III-V 族化合物砷化鎵(GaAs)和磷化銻(InP)具有满足这种需要的极大希望。同硅、鍺相比,这两种化合物半导体具有表 1 所示的特性。数据清楚地表明,假如工艺学上能够充分改进的話,則这些化合物的較大禁帶寬度以及可能較大的迁移率(尤其是 GaAs),应使它們在高頻和高温行为两方面都超过硅和鍺。

整体說来,对于 GaAs 和 InP 的了解远远落后于硅和鍺。这一部分是由于在提純和生长大的单晶两方面都存在巨大困难所

[†] Materials Research on GaAs and InP, Properties of Elemental and Compound Semiconductors (H. C. Gatos ed.), p. 25, Interscience Publishers, New York, 1960.

表 1 Ge, Si, InP 和 GaAs 的半导体特性

半导体	熔 点 (°C)	禁 带 宽 度 (电子伏)	电子迁移率 (厘米 ² /伏·秒)	空穴迁移率 (厘米 ² /伏·秒)	介 电 数	可能的温度 范围(°C)†
Ge	936	0.7	3900	1900	16	-200~100
Si	1420	1.10	1500	500	12	-50~300
InP	1070	1.25	6000	160	10.9	-200~400
GaAs	1240	1.40	12000	450	11.1	-200~475

† 温度极限从杂质激活能、禁带宽度和电导率测量估计。

致。GaAs 和 InP 二者在熔化时均分解形成分离相的挥发性成分。这使得提纯和生长技术必须在挥发成分压力下进行，以保持化学计量比。再者，挥发性成分的高度活性，迫使实际上供设备结构用的材料限制在石英和碳，而所包含的压力需要小心谨慎，以防爆炸。

本文叙述制取这些供物理测试和器件应用的材料，在一般工艺学上所取得的进展。这包括晶体生长方法、化学和冶金提纯、掺杂，以得到所需电学性质的技术以及物理测试。在这个研究中曾将重点放在 GaAs，因为正如表 1 的数据所表明，它具有固有的优点，所以将报导得更详细些。

2. 晶 体 生 长

晶体生长的一般方法采用锗、硅工艺上所用的技术，并加以改进，以防 GaAs 和 InP 的分解。这通常是将包括过剩挥发性成分的材料一起盛放于密封石英容器内，并维持容器最冷部分在一定温度，以保持所需的压力。因而这部分可当作挥发性成分过剩量的贮存器。生长化合物也可不用贮存器，此时部分化合物分解以提供所需的压力。在这种情况下，石英泡的最低温度应保持在冷凝温度以上。实验表明，在 GaAs 和 InP 单晶体生长时，为避免有害影响，分别需要大约 1 大气和 >5 大气压的压力；而要保持

这些压力, 最低的容器温度对 GaAs 需要 600°C , 而对 InP 则为 500°C .

2.1 磁性Czochralski 法

在 Czochralski 法^[3]中, 籽晶从熔体中拉出, 并使它旋轉, 以保持热对称性和圆柱形几何形状. 此法难以修正, 以适应于分解的化合物, 因为籽晶握持器的直移和旋轉均需在热的密封石英管内进行. 这里研究了两种带有驱动机构的籽晶握持器联结方法: 磁性联结^[4]和直接联结. 前者业已取得最好的结果, 并且将是这里所要讨论的唯一方法. 图 1 表示由 Woolston 所设计的磁性联结拉晶器示意图. 进行生长的抽空石英管置于另一有惰性气体循环着的石英管内. 外部石英管被一保持在贮存器温度的繞繞电阻炉包围, 但直接在射頻感应加热线圈上面这部分除外, 以便允许进行观察. 射頻感应线圈将石墨坩埚加热, 后者圍繞在盛有熔体的内部石英管底部. 籽晶握持器套在一精磨过的石英管内, 并且具有一石墨轴承, 以确保动作的平滑性. 密封在石英籽晶握持器内的为四个 Permendur 永磁铁心 ($50\text{Fe}+50\text{Co}$ ——譯者), 它們同置于上部加热器四周的四个永久磁铁

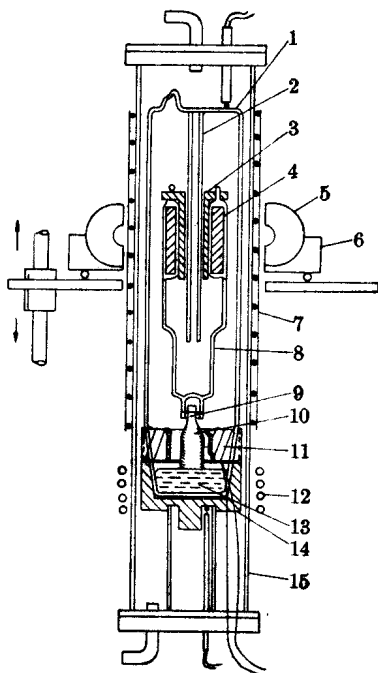


图 1 磁性联结的 Czochralski 法生长 GaAs 用设备

1—内部密封管; 2—精密石英管; 3—石墨轴承; 4—永磁铁心(4); 5—永久磁铁(4); 6—磁铁旋轉支架; 7—加热器; 8—籽晶握持器; 9—籽晶; 10—晶体; 11—供观察用的电加热透明屏; 12—射頻感应加热器; 13—熔体; 14—石墨坩埚; 15—外部石英管

保持磁性联結。四个永久磁鉄安装在一小型旋轉台上,而后者又装在一个提供垂直运动的平台上。这样,旋轉速度和直移速度得以分开控制。

在图1的設備中曾制取了长5"和直径1"的GaAs单晶,其典型例子示于图2。这些晶体是用20轉/分的旋轉速度和0.7毫米/分的控制速度生长出来的,其取向由籽晶加以控制,籽晶軸則符合于 $\langle 111 \rangle$ 方向。熔化是在純化的氬气分压下进行的,因为这不但消除了熔体中的扰动,而且由于减少了GaAs在石英管壁上的沉积,使生长时的可見度得到改善。在这些条件下也曾从 $\langle 110 \rangle$ 籽晶上制得了GaAs晶体。这些 $\langle 110 \rangle$ 晶体不同于鍺和硅,显示出不对称的平面,最可能系因不相对应的 $\langle 111 \rangle$ 平面間生长速度不同的結果。Ellis^[3]曾将这种生长行为同閃鋅矿結構的极性联系起来,他还提出,例如沿 $[111]$ 及 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 軸,可以預期在所生长晶体的完整性方面有所差异。

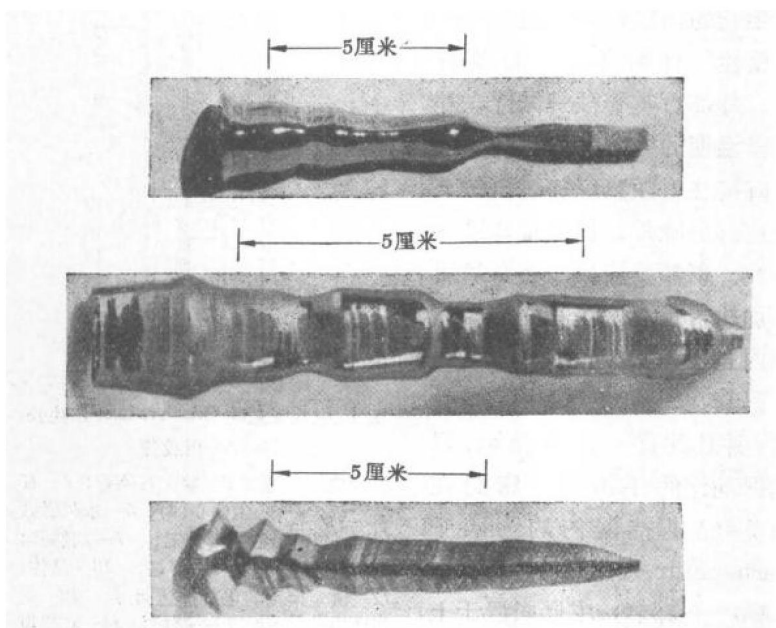


图2 用Czochralski法生长的GaAs单晶。 $\langle 111 \rangle$ 取向

2.2 浮区法

生长晶体的浮区法已在别处^[6]詳細叙述过；在这里只是简单地提一下。将欲处理的材料棒的两端垂直支起。当棒的一部分熔化时，如果对棒的规定直径和熔区长度具有足够大的表面张力，则熔区可保持稳定。晶体的生长随熔区沿着棒向前移动而进行。浮区法的发展是重要的，因为它提供了在无坩埚沾染的情况下通过区域提纯而同时进行晶体生长和纯化。

当修正浮区法以适应于 GaAs 时，将多晶棒支持在密封的石英管内，并用 4 兆赫的射频加热，进行区域熔化。在水冷线圈的上部和下部为辅助性的绕电阻加热器，以获得管内所需的砷蒸汽压。这里所用的设备非常类似 Whelan 等^[7]所叙述的。熔区的移动借石英管相对于射频线圈和辅助加热器的移动来完成，且设计成在一个方向慢移，而在返回时自动加快，因而可以自动地通过任何次。

用浮区法生长 GaAs 单晶时，所遇到的主要困难是熔区不稳定。这种情况的发生，是由于熔区中的温度梯度引起熔体成分的相应变化，结果使得表面张力也发生变化。克服这个困难，须减少射频发生器输出的起伏，并调节辅助炉，使得沿锭的温度分布断面为一平面；除在熔区邻近处以外，后者提供所需砷压的最低温度。此外，还设计了一个单匝射频线圈，以便沿棒产生一个约长 6 毫米的熔区。依靠这些改进，已在晶体上通过多至 14 次的区熔，

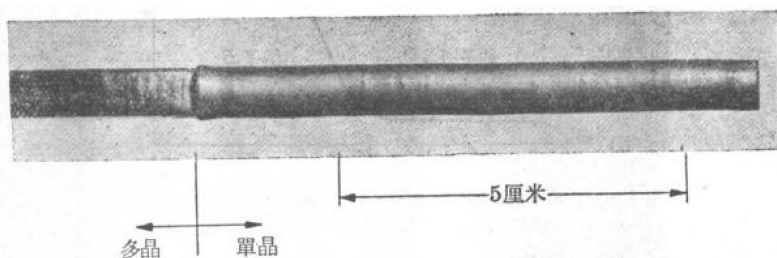


图 3 用浮区法从多晶棒上所生长的 GaAs 单晶

而无須将它从密封石英管内取出。熔区尺寸取决于 GaAs 的表面張力,根据悬吊在 GaAs 棒上的 GaAs 小滴形状,估計其表面張力約为鎢的 2/3 至 3/4。当砷的压力相应于在 600°C 左右元素砷的蒸汽压时,发现表面張力达到最大。

曾用浮区法通过一次区熔而从預先注入石英管中的多晶棒上制得 GaAs 单晶;图 3 所示便是一个例子。此晶体是在熔体上的砷压为 0.9 大气压和熔区移动速度 0.5 毫米/分生长出来的。

2.3 水平 Bridgman 法

Bridgman 生长单晶方法^[8]是,先将錠子完全在坩堢中熔化,然后通过温度梯度而移动此坩堢,这样結晶便在一端开始成核,而后沿熔体生长。由于 GaAs 和 InP 在冷凝时都膨脹,又由于熔体必須同汽相保持平衡,这些化合物宜在密封于抽空石英管内的水平石英舟中生长。

图 4 表示用于 Bridgman 法生长 GaAs 晶体的炉子設計示意

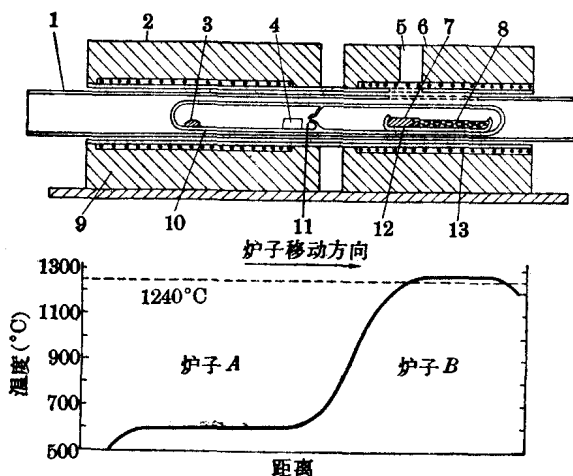


图 4 水平 Bridgman 生长 GaAs 的设备及炉子温度分布

- 1—固定陶瓷管; 2—炉子 A; 3—过剩砷; 4—石英塞; 5—窗口; 6—炉子 B;
7—籽晶; 8—GaAs 熔体; 9—絕热体; 10—密封石英管; 11—打碎的密封;
12—石英舟; 13—炉子繞組

图。它由两个沿反应管放置的綫繞管状加热器組成。右面的加热器保持高出化合物的熔点 (1240°C) 約 20°C ，而另一个則保持在貯存器的溫度 600°C ，以維持 0.9 大氣壓的砷壓。這便得出如图 4 下面所示的爐溫分布圖形。于是按箭头所示方向將套在固定石英管上的整个爐子移动，就可生長晶体。

在用 Bridgman 法生長 GaAs 晶体时，通常的操作程序是：先把整个系統升到大約 600°C 的砷貯存器溫度，然后緩慢地將盛有熔融砷的反应区溫度升高出化合物熔点 20°C 。为了改善单晶的結晶性，生長速度应不超过 1 厘米/小时，而接近固-液界面处的溫度梯度应小于 $30^{\circ}\text{C}/\text{厘米}$ 。还发现（仅非必需）須采用涂碳石英舟，以避免質晶核，后者由于石英的局部潤湿而在錠子边上出現。此外，熔体加籽晶和不加籽晶均能生長单晶；而图 5 便表示一根长 4"，直徑 0.5" 的不加籽晶的 GaAs 晶体例子。



图 5 水平 Bridgman 法生長出来的 GaAs 单晶，未加籽晶

Bridgman 法的主要优点为能够作为常規生产，制取 10~100 克的晶体。所以，这个生長晶体的方法已成为日常制取供物理測試和器件研究用 GaAs 最有用的方法。

2.4 梯度冷凝法

梯度冷凝法^[9]和水平 Bridgman 法一样，也是通过熔融錠子的逐漸凝固而制取单晶。它的不同之处只在于凝固是靠移动沿錠子上的溫度梯度来进行的，所以整个系統是不动的。此法的簡單性，使它特別适宜于 InP，由于存在高的磷壓，而使爆炸的危險性更大。

供 InP 用的梯度冷凝炉示意地说明于图 6。在该设计中，密封石英管基本上分为两段，A 段包含有过剩磷，并维持在系统的最低温度，它确定熔体上面磷的汽压；包含熔融 InP 的 B 段，具有图 6 下面图形所示的温度梯度。凝固通过缓慢降低 B 段的温度来达到，这样凝固点便从熔体的一端移向另一端，正如虚线所示，沿锭的温度梯度向更低温度移动。绝热耐火砖支起碳化硅加热元件，其装置方式可得到一个微向液体凸起的固-液界面，这对良好晶体的生长极为重要。这种生长条件难以总沿锭保持着，因为界面相对于炉子而移动，所以在生长时，其邻近处热的条件遭受到变化。梯度冷凝法曾用来制取供各种测试目的用的的大多数 InP 晶体。GaAs 一般不采用这方法，因在图 6 B 段中温度梯度的最高温

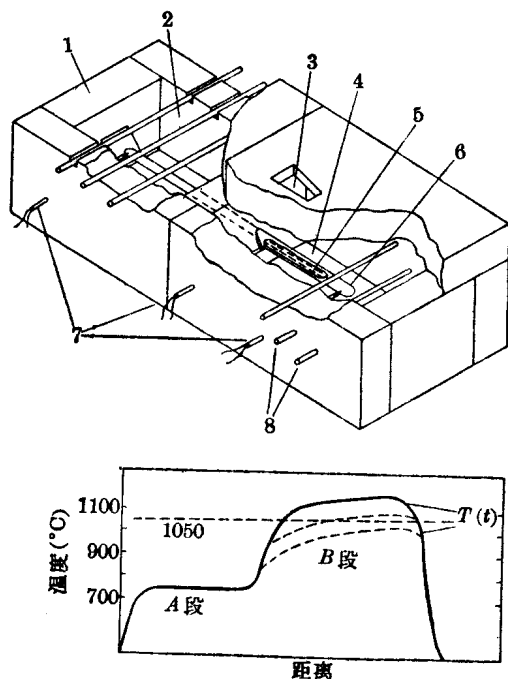


图 6 生长 InP 用的梯度冷凝设备和炉温分布

1—炉子砌砖；2—A 段；3—观察窗口；4—B 段；5—InP 熔体；
6—石英管；7—温差电偶；8—碳化硅棒

度接近于石英软化温度。

In 和 P 反应而形成化合物时所采用的步骤,除了在梯度冷凝法中的密封石英管兼作容器和舟以外,同上述 GaAs 水平 Bridgman 法非常相似。曾经采用过石墨舟,但不很成功,原因在于温度梯度难以提供所需的固-液界面图形。为了避免爆炸,石英管的厚度须达 3 毫米,而孔径为 8~15 毫米。此外,纵使 InP 在化学计量比的分解压力为 60 大气压^[10],但通常晶体生长是在 15~20 大气压 (530~550°C 的贮存器温度) 的磷压下进行的。对于低于 10 大气压磷压下生长出来的材料,发现一般具有较低的迁移率,并且常常由于在固-液界面上自由銻的俘获而显示出孪晶。这是可预料的,因从关于 InP 分解压力和 InP 体系相图的可获得数据^[10, 11]中可以得出結論,即在那样低的磷压下,熔体大约含有 80% 的 InP,其余的则为自由銻。为了改进单晶的结晶性起见,生长速度不超过 1 毫米/小时也是必需的。图 7 表示用梯度冷凝法生长出来的 InP 单晶例子(未加籽晶)。



图 7 用梯度冷凝法生长出来的 InP 单晶,未加籽晶