

一九七二年
砷化镓学术报告文集

上海科技出版情报研究所

前 言

在毛主席无产阶级革命路线的指引下,为了加强学术交流,提高科学技术水平,中国科学院报经国务院批准,会同上海市革命委员会科技组于一九七二年十一月二十日至二十八日在上海市召开了砷化镓学术交流会。会议以交流砷化镓材料研究为主,同时交流器件、测试和分析等方面的进展情况。参加会议的有来自全国十四个省市六十九个单位,共一百名正式代表,五名特邀代表,七十一名列席代表。

这次会议,以批修整风为纲,贯彻执行了毛主席关于“百花齐放、百家争鸣”的方针,做到了畅所欲言,充分交流,认真讨论,相互学习,反映出经过无产阶级文化大革命后学术会议的新气象。会议采取大会学术报告,分组报告和讨论以及专题座谈等形式进行。从学术交流中反映出我国砷化镓材料质量不断提高,器件品种增多,性能逐步改进;有些指标已接近国外先进水平,为我国国民经济和国防建设作出了一定的贡献。会议针对当前存在的问题,对今后工作提出了一些意见和建议。代表们一致表示要理论联系实际,要把科学研究提高到一个新的水平,认真地不断地总结经验,做到有所发现,有所发明,有所创造,有所前进,实现伟大领袖毛主席关于“一定要在不远的将来,赶上和超过世界先进水平”的伟大号召。

为了提供从事砷化镓工作的有关方面参考,我们委托上海科学技术情报研究所将这次会议的一部分报告编成《文集》出版。

砷化镓学术交流会领导小组
一九七二年十一月二十八日

目 录

1. 砷化镓材料质量的初步探讨.....
.....中国人民解放军京字 129 部队 大会特邀代表 林兰英等.....(1)
2. 光谱在砷化镓研究中的应用.....
.....北京大学 大会特邀代表 黄 昆.....(18.)
3. 砷化镓中的未知受主和电子陷阱问题.....
.....中国科学院上海冶金研究所 大会特邀代表 邹元熾.....(22)
4. 金属-半导体接触
.....吉林大学 大会特邀代表 高鼎三.....(61)
5. 半导体器件质量与材料的关系.....
.....天津市半导体技术研究所 大会特邀代表 仇铁儒.....(76)

砷 化 镓 单 晶

直拉长晶

6. 液体密封直拉法合成并生长砷化镓单晶.....
.....中国人民解放军南字 827 部队 砷化镓单晶组.....(83)
7. 在惰性气氛中用三氧化二硼液封一次合成砷化镓直拉单晶新工艺.....
.....上海第二冶炼厂 刘岳田.....(87)
8. 磁耦合法拉制含硅量低的砷化镓单晶.....
.....冶金部有色金属研究院 秦福(执笔).....(95)

横式长晶

9. 关于石英舟的镓处理.....中国人民解放军成字 128 部队 华庆恒.....(103)
10. 用水平法制备高纯砷化镓单晶的几个问题.....
.....中国人民解放军成字 128 部队 华庆恒.....(105)
11. 用水平布里奇曼法制备高纯砷化镓单晶.....
.....中国人民解放军京字 129 部队 砷化镓单晶组.....(110)
12. 拉制及判断砷化镓水平单晶的若干经验.....
.....天津市半导体技术研究所 崔世玮.....(119)
13. 水平三温区炉制备砷化镓单晶及其热处理.....
.....冶金部有色金属研究院 尹庆民(执笔).....(125)
14. 水平区熔砷化镓单晶的腐蚀显微观察.....
.....中国科学院上海冶金研究所 砷化镓晶体组.....(136)

砷化镓外延

气相外延

15. 用 Ga/AsCl₃/H₂ 系统制备高纯砷化镓外延厚膜……………
……………中国人民解放军京字 129 部队 砷化镓气相外延组……………(147)
16. 用于耿氏器件的气相外延高纯砷化镓……………
……………中国科学院上海冶金研究所 砷化镓外延组……………(155)
17. 砷化镓掺碲双道输送气相外延……………北京有色金属研究所 张合珍 张汉祥……………(166)
18. 掺 Te 砷化镓气相外延……………中国科学院上海冶金研究所 砷化镓外延组……………(170)
19. 轻掺锡砷化镓气相外延……………
……………中国人民解放军京字 129 部队 砷化镓气相外延组……………(178)
20. 砷化镓气相外延的一些情况……………天津市半导体技术研究所 第二研究室……………(182)
21. 砷化镓气相外延中不同形式的镓源对载流子浓度的影响……………
……………复旦大学 物理系砷化镓组……………(198)
22. 砷化镓立式外延炉及其工艺……………冶金部有色金属研究院 李玉增(执笔)……………(204)
23. 改善砷化镓外延层纵向浓度分布的均匀性……………
……………中国人民解放军成字 128 部队 张瑞荣 刘学如……………(215)

液相外延

24. 砷化镓液相外延生长……………
……………中国人民解放军南字 827 部队 砷化镓液相外延组……………(220)
25. 砷化镓液相外延工艺和外延层性质的一些探讨……………
……………砷化镓液相外延上海会战组
……………中国科学院上海冶金研究所 砷化镓液相外延组……………(226)
26. H₂O₂-NH₄OH 溶液的化学机械抛光……………
……………中国科学院上海冶金研究所 砷化镓外延组……………(242)

砷化镓器件

微波器件

27. 对影响耿氏二极管性能因素的讨论……………
……………中国人民解放军南字 827 部队 韩继鸿……………(247)
28. 砷化镓器件工艺中若干问题的探讨……………
……………中国科学院上海冶金研究所 砷化镓器件组……………(257)
29. 砷化镓脉冲限累振荡器件与材料的联系……………
……………中国人民解放军京字 130 部队 何家骥 杨耀中 邱素娟等……………(265)
30. 体效应管的集成热沉工艺……………上海无线电十七厂 张翔焜……………(281)

激光器件与发光器件

31. 关于材料参数对砷化镓注入式激光器性能影响的讨论……………
……………中国科学院上海光机所 单振国……(290)
32. GaAs-Al_xGa_{1-x}As 单异质结激光器……………
……………中国科学院上海光机所 陈高庭(执笔)……(305)
33. GaAs-Al_xGa_{1-x}As 双异质结激光器的液相外延生长……………
……………中国人民解放军兰字 826 部队 砷化镓激光器件组……(312)
34. 砷磷化镓发光二极管的制备工艺和特性……………
……………中国科学院吉林物理研究所 曹锦荣……(319)
35. 双补偿 *p-n* 结砷化镓红外发光二极管……………吉林大学 张玉书……(324)
36. 砷化镓结型激光器研制过程中的观察和测量……北京大学物理系激光一组……(328)

砷化镓测试

物理测试

37. 砷化镓晶体的柯塞尔线研究……………
……………中国人民解放军京字 129 部队 李成基 王玉田……(340)
38. 激光探针……………中国人民解放军京字 129 部队 李成基……(346)
39. 用击穿电压法测量砷化镓材料的杂质分布……………
……………中国人民解放军京字 129 部队 周洁 李树英 李成基……(351)
40. 一个测量砷化镓材料(器件)强场电学性质的方法……………
……………中国人民解放军京字 129 部队 王占国……(355)
41. 半导体薄层中杂质浓度分布的测量……………
……………中国人民解放军成字 128 部队 罗夷伦……(358)
42. 用几何磁阻法测量低阻(*n*⁺)衬底 *n* 型砷化镓外延层的霍耳迁移率……………
……………中国科学院上海冶金研究所 砷化镓测试组……(364)
43. 用红外干涉法测量砷化镓外延层厚度……上海市计量测试管理局 邱晓竞……(368)
44. 体效应器件的腔体稳频法……………南京 252 信箱 冯治兴 陈丽芳……(374)

化学分析

45. 砷化镓分析概况……………冶金部有色金属研究院 蔡绍勤(执笔)……(381)
46. 砷化镓、镓中杂质的质谱分析法……中国科学院上海冶金研究所 化学分析室……(393)

砷化镓材料质量的初步探讨

中国人民解放军京字 129 部队 林兰英 王占国 向贤碧

半导体材料的质量,一般均用三个主要参数即纯度、均匀性和完整性来衡量。如想提高材料的质量,以满足器件要求,首先必须具有鉴定这些参数的工具。为此,我们介绍了鉴定材料质量的一些方法。这些方法各有优缺点,需要取长补短,才能达到为材料制备、提高质量提供有用的资料。砷化镓材料用于制造微波器件时,其中限累二极管对材料的要求是比较高的。所以我们考虑到限累二极管工作条件,在强电场下测量了管子的迁移率随电场强度而变化的情况,希望了解影响器件性能的还有哪些材料的参数是我们未认识到的。同时也做了一些材料退化问题的初步探讨,得到了一些初步的结果,有待于深入研究其本质问题,为保证器件稳定工作创造条件。

一、砷化镓材料质量鉴定的一些方法

表征半导体材料性能优劣,一般常用纯度、均匀性和完整性来描述,而针对这三方面的内容所建立的测试方法是很多的,下面我们就常用的几种方法叙述如下。

1. 砷化镓材料的均匀性

砷化镓材料的均匀性,常分横向和纵向均匀性两方面,而现有的研究和测试均匀性的方法也各有局限性。激光光电导^[1]是为适应微波器件发展的需要而建立起来的一个方法,它用来检验外延夹层和器件电极接触性能的好坏,其结果是定性的。对于外延和体材料的非夹层性质的不均匀,此法不能灵敏地真实地反映出来。据国外报道^[2],离子探针微分析器能逐点逐层地对材料的杂质和均匀性分布进行测定。击穿电压法^[3]作为一个粗略地快速检验均匀性手段是可取的。通过磨斜面和微动探针能将材料的纵向(横向也可)均匀性分布自动记录出来。其主要的缺点在于不能对薄层、微区进行分析。电容电压法^[4]用来确定同型层(n^+n)外延材料的均匀性是个较好的方法,只要能使耗尽层深入衬底(如 n^+n 结区),就能提供界面上的浓度分布情况^[5]。对厚的外延层,必须经磨斜角并在斜面上蒸多个金点,然后进行逐点测量,方能了解均匀性分布,因此是破坏性的方法,对限累器件不利。它还不能将衬底与外延开始时淀积的高掺杂薄膜区分开来。此外,电容电压法比较繁杂,使用起来不如上述的方法简便。二次谐波法^[6]已广泛用来研究薄层结区的浓度分布,它同电容电压法相比,具有简单、较高分辨率等特点。对于厚的外延材料,此法同样是破坏性的测量方法。

综上所述,只有各个方法配合使用,取长补短才能较完善地如实地反映材料的均匀性分布。

2. 砷化镓材料的纯度和深能级问题

(1) 离化杂质总浓度的估计方法

高纯度的外延和正电阻温度系数的砷化镓材料的电离杂质总浓度估计,一般采用低

温激活能法^[7]和电离杂质散射法^[8]。前者比较直接,但实验条件较困难,费用昂贵;后者是个间接的方法,依赖于正确的“晶格散射迁移率 μ_L ”的选取,所以结果有一定的任意性。如果将此法同低温激活能法比较,选取相应的“ μ_L ”后,所得结果就比较可靠了。

对于禁带中有一个(或几个)电子陷阱的砷化镓材料,假定陷阱的状态密度不很大(低温时全部被填满),也可以用低温激活能法分别将 N_A 、 N_D 和 N_t 求出来^[9],不过在计算时比较复杂一些罢了。多能级的复杂情况(如部分填满情况),一般不宜用此法进行估计。

(2) 深能级状态密度和性质的研究

变温霍尔系数的测量,可用来确定深能级在禁带的位置。在耗尽区,根据平台出现的位置可直接估计出深能级状态密度 N_t 。当深能级状态密度同浅施主态密度可比拟或低时,此法则不能精确求出。热激电容^[10]和光荧光测量^[11],原则上可以比较快速地同时确定几个能级的位置和态密度。光荧光需要在4.2°K下进行测量,否则将不能测出浓度低于 10^{16} 厘米⁻³的能级存在。红外光电导法^[12]也能起类似的作用。

上述方法共同的缺点在于不能确定深能级的本质是什么。要了解这个重要问题,必须作更深入的工作。最近,Chang等^[13]在5°K对退火的砷化镓材料进行了阴极荧光测量。退火是在控制砷气压的情况下进行的,退火温度为600~1,100°C,观察了缺陷的各种能级,并从砷气压的关系决定了能级同砷空位或镓空位的结合关系。此外,对砷化镓材料进行有意识的掺杂研究,有助于了解缺陷、杂质以及它们的络合物对于深能级形成的作用。

3. 砷化镓材料的完整性

研究砷化镓材料完整性的方法很多,如对位错、层错和其它缺陷的显微观察,表面状态的扫描电子显微镜观察等。近年来,通过X光反常透射^[14]和柯塞尔图^[15]等方法研究材料的完整性,对了解砷化镓材料的缺陷(如位错)分布等有很大帮助。最近,通过对砷化镓材料的柯塞尔图观察表明,尽管外延材料的纯度比体材料高1~2个数量级,但是由于完整性、均匀性不能很好控制,在相同的实验条件下,观察不到外延材料的柯塞尔图形,相反体材料的图形却较清楚。因此对材料完整性的观察和研究应引起我们的重视。

最近关于高压电子显微镜^[16]用来观察缺陷中心状态以及杂质、空位和间隙原子的相互作用等已有报道,它能深入到晶体的一定深度,这个方法也应引起我们注意。

二、砷化镓材料的电阻温度系数研究

1. 砷化镓材料的电阻温度系数测量

外延材料(气、液相)的电阻温度系数一般来说是正的,但也有例外。实验发现,某些外延材料样品, $\frac{d\rho}{dT}$ 在400°K以前为正,大于400°K后 $\frac{d\rho}{dT}$ 又变为负。出现这一现象的主要原因可能是来自衬底的反扩散和砷、镓组分比偏离造成的,这个问题有待于进一步研究。

体砷化镓材料, $\frac{d\rho}{dT}$ 一般为负,多是同深的电子陷阱(如 $E_c-0.2$ 电子伏)存在有关。改进工艺后可获得 $\frac{d\rho}{dT}$ 为正的材料。在富砷条件下,所获得的材料温度系数类似外延中所发现的由正变为负的现象,这似乎说明组分的偏离是引起这一现象的看法有一定的根据。

图1是四种材料典型的电阻温度系数例举,从图1可以看出, $\frac{d\rho}{dT}$ 的变化率以体材料 ($\frac{d\rho}{dT} > 0$) 为最小,气相次之,液相最大。这是以我们的材料水平为基础统计所获得的看法,就每种材料自身而言,也各有差异。 $\frac{d\rho}{dT}$ 变化率与材料的纯度、完整性、均匀性以及深能级的位置和态密度等有关,这里只作定性介绍,不去详细分析了。

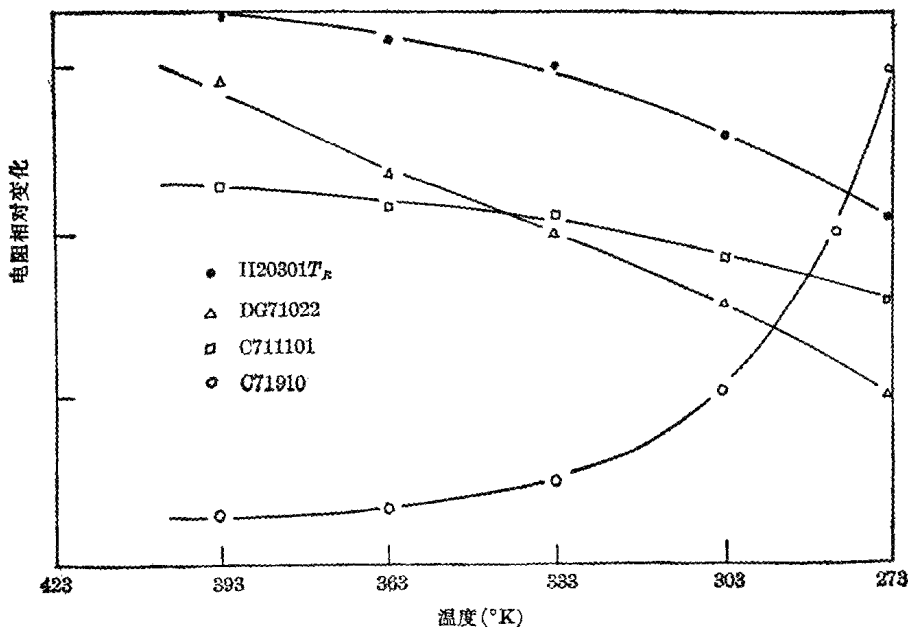


图1 四种材料典型的电阻温度系数例举

2. 正负电阻温度系数体材料参数和它们的器件性能对比

砷化镓材料的能带结构特点和高的漂移速度,使它具备了电子转移器件的条件。对于实际的砷化镓材料可能出现各种问题,例如:在禁带中引入深能级 E_t 后(可能是电子陷阱或深施主中心等),它可能对电子转移产生明显影响。负电阻温度系数的体材料就是这种情况。Law 和 Kao^[17] 曾指出,深电子陷阱能级在强电场的作用下,能俘获 L 谷的电子,从而加强了负阻效应。高阻砷化镓体材料中的低频振荡^[8],人们一般都认为是这种能级引起的。然而这些分析都不是限累器件的实际工作情况,因为当电场超过阈值电压几倍至几十倍后,晶体内的杂质原子、缺陷中心及其它们的络合物所形成的能级可能由于碰撞电离等作用而参与导电过程。因此 $\frac{d\rho}{dT} < 0$ 的体材料用作限累器件时(特别在高占空因子情况下),由于器件自热或强电场的激发载流子参与导电过程,从而严重影响功率输出和频率的稳定性。

$\frac{d\rho}{dT} > 0$ 的体材料与 $\frac{d\rho}{dT} < 0$ 的材料相比,电学参数有明显的提高(如深能级密度 N_t 大大降低、迁移率有所提高等)。器件的初步结果也反映了这一点,下面我们将作简单比较,表1和表2列出了典型的体材料 ($\frac{d\rho}{dT} > 0$ 和 $\frac{d\rho}{dT} < 0$ 的)和它们的器件参数,仅供参考。

表1 两种温度系数的砷化镓体材料参数对比

分 类	参 数	单 晶 编 号	
		C71910	C711101
		$\frac{d\rho}{dT} < 0$	$\frac{d\rho}{dT} > 0$
晶 体 参 数	生长方法	管 壳	微量镓“富”，900°C，12小时退火
	晶体长度(毫米)	70	60
	单晶率	90%	80%
	晶体重量(克)	56	64.5
均匀性 分 布	载流子浓度(厘米 ⁻³)	17.0~7.0×10 ¹⁴	5.0~1.4×10 ¹⁵
	迁移率(厘米 ² /伏·秒)	5,000	6,500~8,000
纯 度	(N _D +N _A) (厘米 ⁻³)	—	3~5×10 ¹⁶
	N _A /N _D	—	82.6%
完整性	柯塞尔图	清 晰	清 晰
典 型 电 学 参 数	深能级位置(电子伏)	E _c -0.20	未发现
	深能级态密度(厘米 ⁻³)	≤5×10 ¹⁵	≪10 ¹⁵
	n _{300°K} (厘米 ⁻³)	1.46×10 ¹⁵	1.33×10 ¹⁵
	μ _{300°K} (厘米 ² /伏·秒)	5,320	9,000
	n _{80°K} (厘米 ⁻³)	—	7.6×10 ¹⁴
	μ _{80°K} (厘米 ² /伏·秒)	—	2.04×10 ⁴
	n _{500°K} (厘米 ⁻³)	5×10 ¹⁵	1.80×10 ¹⁵
	μ _{500°K} (厘米 ² /伏·秒)	4,500	5,000

表2 两种温度系数的体材料器件参数对比

参 数		C71910 器件	C711101 器件
电 学 参 数	n _{300°K} (厘米 ⁻³)	7~8×10 ¹⁴	1~2×10 ¹⁵
	μ _{300°K} (厘米 ² /伏·秒)	5,000	6~7.5×10 ³
	$\frac{d\rho}{dT}$	<0	>0
	柯塞尔图	清 晰	清 晰
微 波 参 数	P _{最大} (瓦)	≅150	≅100
	f (千兆周)	7.0	7.0
	占空因子	1:3×10 ⁴	1:3×10 ⁴
	Δf (兆周)	100	7~8
	高占空因子时的稳定性	1:2,400(明显不稳定)	1:1,100(较稳定)
	输出功率稳定性	波动较大	开始不稳
投片出管成品率		成品率较高	成品率较低

注: 数据尚不充分, 仅供参考

从表1和表2的对比来看, $\frac{d\rho}{dT} > 0$ 的体材料无论是材料参数或者是器件性能都比 $\frac{d\rho}{dT} < 0$ 的好一些, 特别是当占空因子增加时更为明显(当然不是所有的参数都好, 如 $\frac{d\rho}{dT} > 0$ 的强场伏安特性就不如 $\frac{d\rho}{dT} < 0$ 的材料)。目前所获得的 $\frac{d\rho}{dT} > 0$ 的体材料, 一般都是采用所谓微量镓“富”和(750~900°C)退火工艺。据已有的资料表明, 这类退火材料强场特性不好, 高占空因子工作时热稳定性似乎也有些问题; 因此进一步开展这两方面的研究是十分必要的, 下面我们再作讨论。

3. 可能的趋势

从微波器件(特别是限累器件)对砷化镓材料的要求来看, 目前我们的材料水平相差还比较远。三种材料各有优缺点, 表3列出了三种材料(体、气和液相材料)限累器件的国内外水平。可以看出, 在低占空因子下工作, 输出脉冲功率最高的还是体材料, 气相外延材料多用于耿氏管, 而较少用于限累器件(因为在厚的有源区里很难保证其层间均匀性)。液相外延材料, 已经作出较高质量的限累二极管, 特别在高占空因子下能稳定工作, 引起了国内外的广泛重视。分析以上情况, 我们认为, 现有的三种材料目前还不能互相取代。我们的任务在于找出一个方案, 能取各个之长, 补其所短, 创造一种新的晶体生长工艺, 为微波器件发展提供好的基础。那种认为液相外延材料最有前途、气相外延材料为次和体材料应当淘汰的看法是不够全面的, 其根据也不十分充足。

表3 三种材料及其器件的水平

参 数		材 料		
		体材料水平单晶	气相外延单晶	液相外延单晶
材 料 水 平	纯 度	6~7个“9”	7~8个“9”	8~9个“9”
	均 匀 性	单晶横截面中心部分均匀	纵向均匀性差	可作到较均匀
	完 整 性	较 好	较 差	比气相好
	温 度 系 数	不易作到>0	易作到>0	易作到>0
	单晶成品率	一次可获得较大量的材料	较 少	最低(周期长)
器 件 水 平	国际水平	1.75千兆周, 占空因子 6×10^{-6} 6,000 瓦, $\eta=15\%$	2.2 千兆周(L波段) 143 瓦, 19%	5.0 千兆周, 占空因子 10^{-5} 2,000 瓦, 10%
		7.0千兆周, 占空因子 6×10^{-6} 2,000 瓦, 4%	L-S 波段 220 瓦, 32.2%	5.0 千兆周, 占空因子 10^{-2} 300 瓦, 4%
			8.7 千兆周, 连续, 0.78 瓦, 2.5%	9.4 千兆周(X和Ku波段), 400 瓦, 10%
	国内水平	7.0 千兆周(X波段), $\cong 150$ 瓦	S-C 波段, $\cong 300$ 瓦	5 千兆周(O波段), $\cong 50$ 瓦

三、砷化镓材料的稳定性研究

实验中曾观察到,砷化镓材料器件有“退化”问题(一是高占空因子的热稳定性不好,二是强电场作用下的击穿)。我们下面进行简单的讨论。

1. 砷化镓材料的退化问题(热稳定性)

砷化镓体材料器件在大电流脉冲作用后,常常发现器件电阻发生变化(有大有小),低场迁移率降低。究竟是材料的问题呢,还是器件工艺的问题,目前还不清楚。为此我们作了如下三方面的试验,仅供商讨。

(1) 砷化镓体材料($\frac{d\rho}{dT} > 0$)高温电学性质的研究

图2是典型的 $\frac{d\rho}{dT} > 0$ 砷化镓材料的载流子浓度 n 和电阻率 ρ 随温度的变化曲线,温度范围从 $300 \sim 800^\circ\text{K}$;在整个温度范围内,没有发现由于退化而产生的反常变化。 n 和 ρ 在 500°K 以下基本不变。在 650°K 以上, n 和 ρ 有较大的变化,这是由于本征激发的贡献。

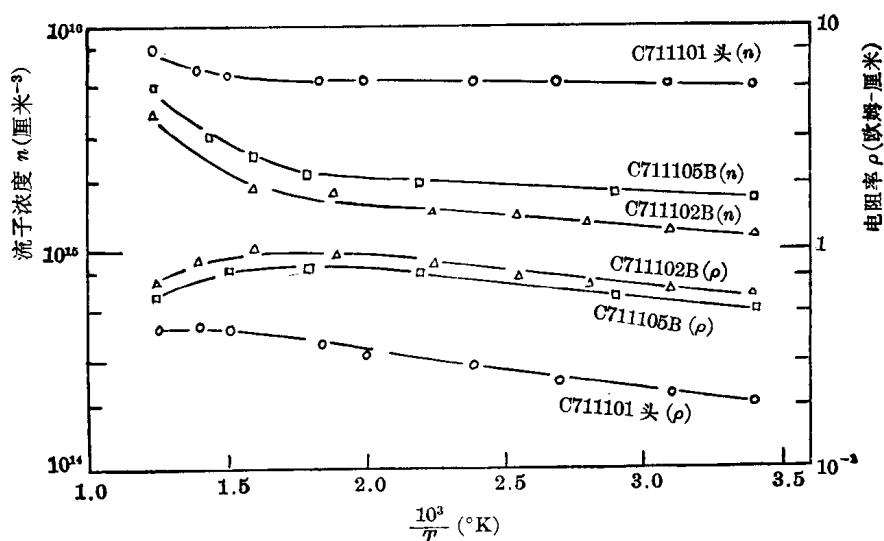


图2 载流子浓度 n 和电阻率 ρ 随温度变化的曲线

(2) 砷化镓体材料($\frac{d\rho}{dT} > 0$)低温热处理实验

将样品放在 500°K 的恒温器内, (空气中) 处理几个小时, 然后自然降到室温。测量处理前后的电学参数 (n 和 μ), 虽有变化 (浓度降低, 迁移率增加), 但不明显。当温度高于 600°K 以上处理时, 降温后常发现电极变为高阻或严重整流 (空气、低真空和气氛中处理都有类似情况)。在磨掉表面层和重作电极后, 电学参数基本不变。可见主要原因是电极高温下变坏, 而不是材料本身的退化。表4是实验的典型结果摘录, 但是由于工作还不够深入, 数据也不充分, 所以还不能做出明确结论。

表 4 体砷化镓材料(500°K)热处理前后的实验结果

样品编号	电 学 参 数			
	处 理 前		处 理 后	
	$n_{300^{\circ}\text{K}}$ (厘米 ⁻³)	$\mu_{300^{\circ}\text{K}}$ (厘米 ² /伏·秒)	$n_{300^{\circ}\text{K}}$ (厘米 ⁻³)	$\mu_{300^{\circ}\text{K}}$ (厘米 ² /伏·秒)
C720401*	3.72×10^{14}	6,150	3.60×10^{14}	6,370
C720705	6.65×10^{15}	6,700	6.40×10^{15}	7,500
C720711	1.28×10^{15}	6,700	1.19×10^{15}	7,000

* 此样品 $\frac{d\rho}{dT} \approx 0$

(3) 砷化镓体材料器件的大电流冲击实验

除上述的实验外,我们针对这类材料的器件,在液空温度下,作了大电流冲击实验(为了保证器件良好散热,将管子浸在液空中)。一般来说,在经过 0.75~1.2 安的大电流短时间冲击后,多数管子的直流电阻和零场磁阻迁移率都发生了较大变化。这种变化是不可恢复的永久性的,可能的原因分析如下:

C711101(55)号管子(在 X 波段应用时输出脉冲功率为 300 毫瓦)。约在 1 安的电流冲击下,管子直流电阻由 1.87 欧姆增加到 5.02 欧姆,零场磁阻迁移率由 6,280 厘米²/伏·秒下降到 4,200 厘米²/伏·秒。从管子的解剖(如图 3 所示)看出,管芯同管座接触十分不良,轻轻一碰,便脱落下来。显微观测发现下电极和底座键合极为粗糙,约有 30~40% 的空洞区。因此可见,由于电极接触不佳,热阻较大,在大电流冲击下电极局部烧毁,使接触电阻增加,迁移率下降,而不是材料本身的退化。

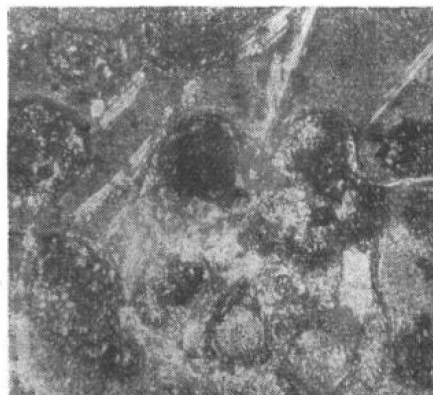


图 3 黑包是接触区,其余是空洞,约占 30~40% 左右

C711101(41)1, 2 管子,在大电流冲击后,直流电阻都减小了,迁移率也明显降低。显微观察发现上下电极之间有一条明显的烧痕。如图 4 所示。这个烧痕形成漏电沟道,使器件电阻和迁移率降低。这种烧毁是材料自身的缺陷和不均匀性引起的呢,还是器件工艺的问题,应进一步研究。

C711102(2)管子是一个可能说明材料退化现象的例子(管子在 X 波段应用,脉冲输出功率为 2 瓦),在 1.40 安电流冲击下,电阻由 3.50 欧姆增加到 6.82 欧姆,但磁阻迁移率没有明显变化。这说明不是由于器件接触电阻增加引起的,很可能是材料本身的退化(电阻率增加、浓度降低),否则不能解释磁阻迁移率不变的实验结果。为什么在大电流冲击后使载流子浓度降低?其机理有待进一步探讨。

综上所述,初步的实验结果表明,体材料($\frac{d\rho}{dT} > 0$)器件的热稳好性不好可能与器件工艺(如接触性能、散热情况和热阻大小等)和材料自身的退化有关。关于材料退化的问题,还必须进一步地深入研究。

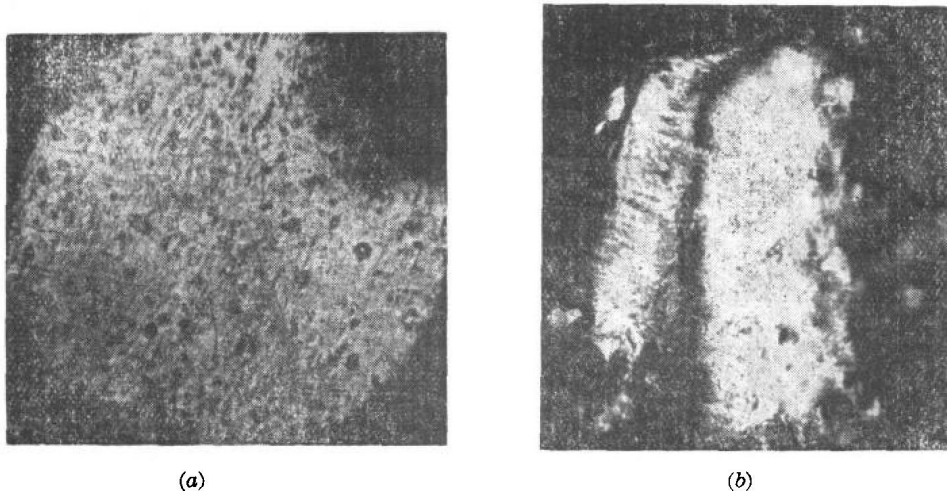


图4 C711101 器件管芯被击穿后的显微照片
(a)是俯视图, 右上角是击穿部分, (b)是侧面图, 相应于(a)的右上角击穿沟道

2. 体砷化镓、气相材料的强场性质研究

砷化镓材料微波器件的性能好坏常与材料的低场电学参数不对应。如: 好的体材料单晶 ($\frac{d\rho}{dT} > 0$, $\mu_{300^\circ\text{K}} = 6 \sim 7,000$ 厘米²/伏·秒, $n_{300^\circ\text{K}} = 1 \sim 2 \times 10^{15}$ 厘米⁻³) 往往不能对应高质量的微波器件。而 $\frac{d\rho}{dT} < 0$ 有深电子陷阱的材料却作出了较好的器件。这就使我们想到, 现用的低场电学参数能不能正确地反映强电场下材料的性质? 本节针对这个问题, 应用限累管作样品, 对材料的强场性质作了初步的研究。

实验装置和测量方法请参考文献^[19], 简单的实验结果如下。

(1) $\frac{d\rho}{dT} < 0$ 的体材料器件

表5列举了体砷化镓材料器件的1千伏/厘米下的电阻, 零场、1千伏/厘米电场和阈值

表5 $\frac{d\rho}{dT} < 0$ 的体材料器件强场实验结果

样品编号	参 数				注	
	$R(1\text{千伏/厘米})$	μ_0	$\mu(1\text{千伏/厘米})$	μ_T		
	(欧姆)	(厘米 ² /伏·秒)		$\frac{\mu_0 - \mu_T}{\mu_0}$		
					(%)	
C71910(15)	7.56	6,050	4,710	3,920	35.2	管子受过电冲击
C71910(18) ₂	6.00	5,460	4,690	3,970	27.3	起振有功率
C71910(22)	10.22	6,460	5,270	4,180	35.3	同 上
C71910(2)	5.73	5,280	4,100	2,470	53.2	同 上
C719101(8)		5,400	5,000	3,440	36.5	同 上
C71910(18) ₁		4,650				强场无磁阻
C701113(36)	8.02	5,920	5,320	4,680	21.0	起振有功率

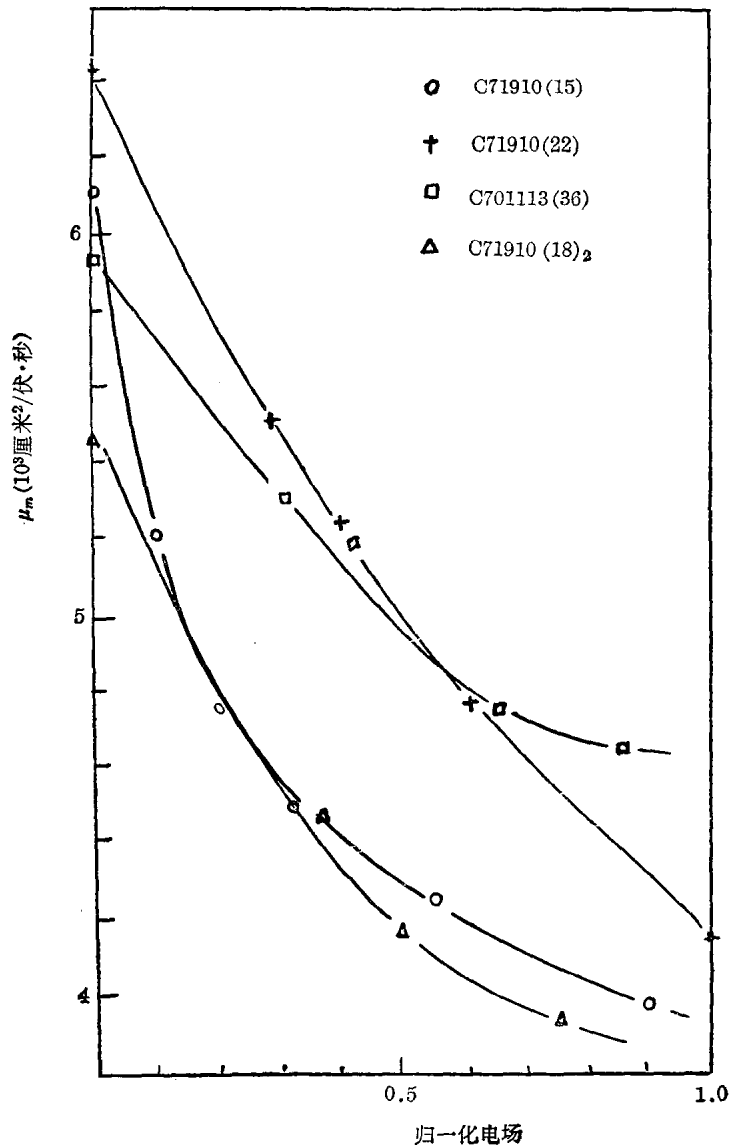


图5 $\frac{d\rho}{dT} < 0$ 体材料 μ_m 同归一化电场曲线

电场 V_T 下的磁阻迁移率变化情况。图5是几个典型的样品磁阻迁移率同归一化电场曲线。以C71910为例，从单晶头到尾投片，出管成品率高，大都起振。X波段脉冲输出功率最高为150瓦左右，当占空因子提高到1:2400时，器件工作明显不稳(功率下降、频率漂移)。阈值电场下，迁移率下降在25~35%范围内，迁移率低于5000厘米²/伏·秒的C71910(18)₁材料器件，强场测试常常发现迁移率下降极快，或表现为无磁阻。

(2) $\frac{d\rho}{dT} > 0$ 的体材料器件

表6和图6分别列举了 $\frac{d\rho}{dT} > 0$ 的体材料器件的实验结果和 μ_m 同归一化电场曲线。以C711101材料器件为例，从头到尾投片，仅部分管子起振(多数不振)，就起振的管子来说，

在 X 波段脉冲输出功率最大为 100 瓦左右。当占空因子提高到 1:1100 时, 仍有较稳定的功率输出。强场迁移率变化类似于 $\frac{d\rho}{dT} > 0$ 的材料器件结果。但是不起振的管子迁移率在 1 千伏/厘米 时的下降就超过了起振管子在阈值时下降的幅度。可见强场性质的研究十分必要, 它有可能为器件提供有益的数据, 以弥补低场电学参数的不足。

表 6 $\frac{d\rho}{dT} > 0$ 的体材料强场实验结果

样品编号	参 数					注
	R (1千伏/厘米)	μ_0	μ (1千伏/厘米)	μ_T	$\frac{\mu_0 - \mu_T}{\mu_0}$	
	(欧姆)	(厘米 ² /伏·秒)			(%)	
C711101(32)	9.32	5,500	4,900	3,990	26.1	起振有功率
C711101(41)	4.14	5,801	3,400			不 振
C711101(55)	9.73	5,770	4,550	3,980	31.9	电极重作
C711101(62)	4.23	6,270	4,000			不 振
C711101(51)	4.46	6,230	3,740			不 振
C720705(2)	5.93	6,630	4,710	2,790	58	起振, 无功率
C720705(10)	5.47	6,530	4,510	3,690	43.5	同 上
C720401(5) ₁	12.8		5,150	5,000		起振, 功率未测
C720401(5) ₂	8.24	6,070	4,810	4,100	32.4	同 上
C720401(5) ₃	9.52	6,180	5,220	4,670	24.5	同 上
C711101(49)	4.12	5,860	3,430			不 振
C711101(58)	3.66	6,450	3,900			不 振

(3) 气相外延材料器件

表 7 和图 7 分别列举了气相外延材料器件的强场参数和 μ_m 同归一化电场关系曲线。实验样品较少, 因此所列举的数据有局限性; 但是, 我们看到, 气相外延材料尽管表观零场磁阻迁移率 μ_{m0} 都较高, 但当电场增高后, 迁移率却大大降低(较体材料下降为快)。即使起振, 输出脉冲功率也不高(在 X 波段, 仅有几瓦的功率)。原因可能是同材料的纵向不均匀、器件制作工艺(如接触性能不佳)等有关。下面我们再作简单的讨论。

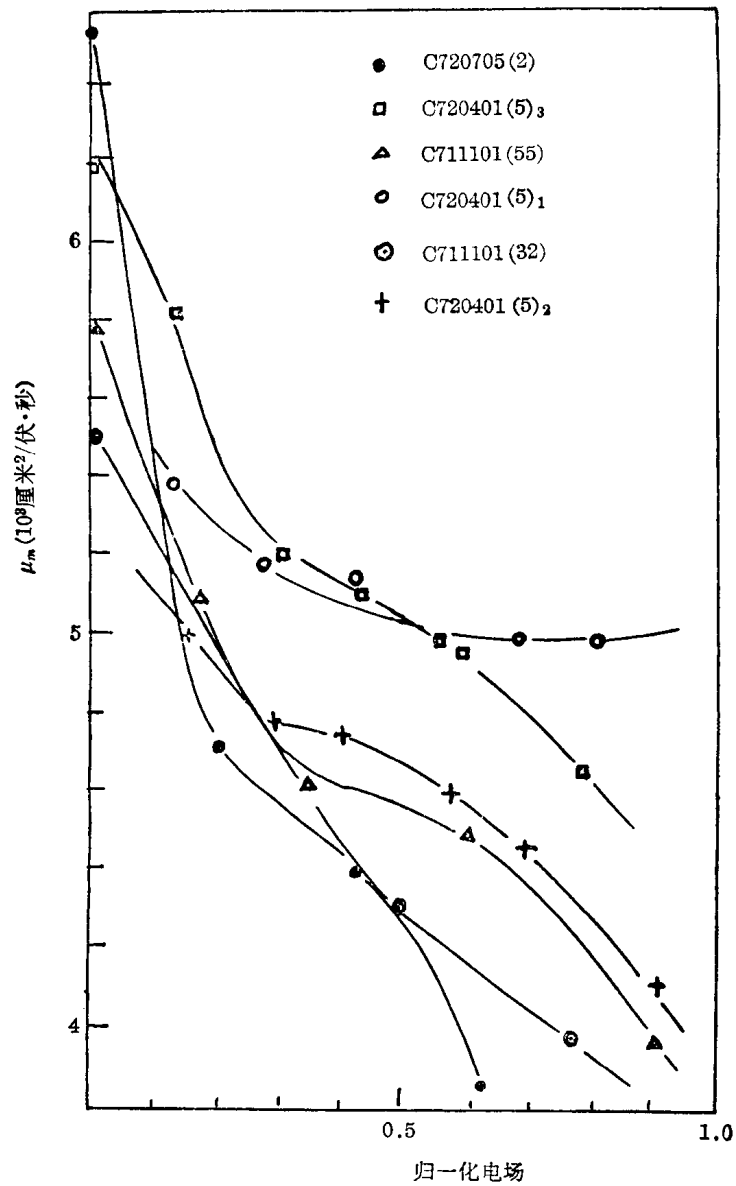


图6 $\frac{d\rho}{dT} > 0$ 的材料器件 μ_m 同归一化电场曲线

表7 气相外延材料的实验结果

样品编号	参 数					注
	R (1千伏/厘米)	μ_0	μ (1千伏/厘米)	μ_T	$\frac{\mu_0 - \mu_T}{\mu_0}$	
	(欧姆)	(厘米 ² /伏·秒)			(%)	
DG71015(3)	4.30	7,150	6,550	5,000	30.0	起振,有功率
DG72006(2)	4.00	8,610	7,100	5,300	38.5	同 上
71CG34(2)	3.78	5,730	2,970			不 振
71CG 6 (3)	5.83	7,970		4,210*	41.0	未到阈值
DG72011(6)			1,750			不 振
DG72006(4) ₂	5.21	7,700	5,000	4,230	45.0	微 振
DG72006(6)	4.52	8,340	5,020			不 振
DG72006(4)		8,750	8,330	6,740*	25.0	未 振

* 当电场加到3.2千伏/厘米时,未起振

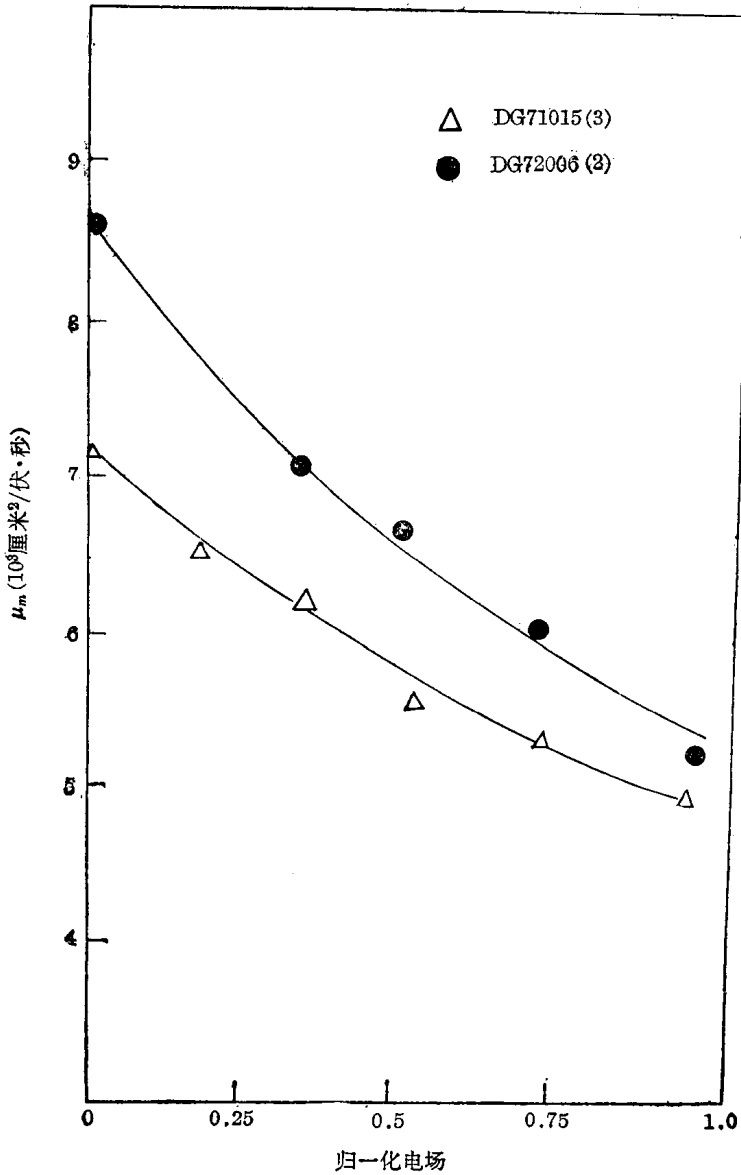


图7 气相外延材料器件的 μ_m 同归一化电场关系曲线

(4) 热处理材料(饱和镓溶液中通氢)器件

表8和9是饱和镓溶液里通氢热处理材料器件的强场参数和电阻变化数据。这种材料在实验中经常发现有退化现象;电阻随电场的变化反常。

表8 热处理材料器件的实验结果

样品编号	参 数					注
	R (1千伏/厘米)	μ_0	μ (1千伏/厘米)	μ_T	$\frac{\mu_0 - \mu_T}{\mu_0}$	
	(欧姆)	(厘米 ² /伏·秒)			(%)	
HC7012114-8	6.72	5,870	4,310	3,080	47.5	微 振
HC7012114-9	12.10	6,110	6,080	4,970	18.7	起振,有功率