

升华外延碳化硅 p-n 结的性质*

冯锡淇 骆宾章

(中国科学院上海硅酸盐化学与工学研究所)

提 要

本工作测量了升华外延碳化硅 p-n 结的电流-电压特性和空间电荷电容。通过对正向电流-电压特性及电容-电压特性的分析,表明:随着外延生长条件的不同,这种 p-n 结的结构可以在相当宽的范围内变化,从近于线性梯度结直到典型的 p-i-n 结,而大多数 p-n 结则介于这两者之间。文中就外延生长条件对 p-n 结结构的影响进行了简略的讨论。

此外,还给出了升华外延碳化硅 p-n 结正向电发光的亮度-电流关系、光谱分布以及脉冲和交流激励的测量结果。

一、引 言

自从1955年 Lely^[1]用升华法在实验室生长出可以控制纯度及人为掺杂的碳化硅单晶片以来,碳化硅半导体结型器件已有很大发展。目前已制成 500°C 下工作的高温整流器、中子探测器、电发光器件等。近年来,对碳化硅基本性能参数的了解日益深入,看来它在高频大功率器件方面颇有潜力。它的最大反向击穿电场几乎是硅的十倍^[2],饱和载流子漂移速度可达 $1.3-2.0 \times 10^7$ 厘米·秒⁻¹^[3],而热导率约为硅的三倍、砷化镓的十倍^[4]。再加上碳化硅固有的稳定和耐高温的优点,以致有人认为,在某些运用条件下,用碳化硅制作的碰撞雪崩渡越时间二极管,甚至有可能超过硅和砷化镓^[3]。

随着碳化硅结型器件的发展,促使对碳化硅 p-n 结的结构进行了相当广泛而深入的研究^[5-7]。这种知识对于提高碳化硅半导体器件的性能乃至开拓新的器件是必不可少的。碳化硅的禁带宽度在室温下高达 2.9 电子伏,这就给碳化硅 p-n 结带来了与常用半导体锗、硅 p-n 结不同的一系列特点。碳化硅迁移率低,非平衡载流子寿命短,扩散长度很小,因而在分析结的结构时,不能简单地搬用通常的肖克莱理论。而且由于如此大的禁带宽度,以致在制备 p-n 结的高温下仍有一定的内建电场存在,导致 Pell^[8]所描述的离子漂移效应发生。Greebe^[6]研究了生长型碳化硅 p-n 结的电流-电压特性及光伏效应,深入地分析了这种离子漂移效应对碳化硅 p-n 结性质带来的影响。由于制备碳化硅 p-n 结的方法繁多,而在各种方法中,温度、杂质、时间、升降温制度各不相同,因而生长过程中杂质离子漂移、扩散的情况也不一样,相应的 p-n 结结构也就有很大的差异。由此可见,对某一类碳化硅 p-n 结的结构性质,应结合它的制备过程作具体的分析。

我所曾在升华外延法制备碳化硅 p-n 结的基础上试制了碳化硅电发光二极管^[9], 鉴

* 1978年9月19日收到。

于此种 p-n 结的结构缺乏现成资料,本文试图通过对升华外延碳化硅 p-n 结的正向电流-电压特性及势垒电容-电压特性的分析,判明这种 p-n 结的结构性质,并进而探索人为控制该 p-n 结结构的可能性。

近年来,数字仪表迅速发展,半导体电发光日益为人瞩目。碳化硅由于其化学性质稳定、耐高温、发光波长可遍及整个可见光区域等优点而受到注意。本文对升华外延碳化硅 p-n 结的亮度-电流关系、光谱分布、脉冲工作时的响应和余辉,以及高频调制特性进行了研究,以便为使用和研究碳化硅电发光器件提供参考。

二、样 品 制 备

升华外延碳化硅 p-n 结的制备工艺已有人作过描述¹⁾。外延衬底为六方 n 型单晶片,用汽相升华外延工艺制备 p-n 结,以 (0001) 面为生长面,先在 n 型衬底上生长一层 n 型膜,然后再外延一层 p 型膜,氩气氛,在 2100—2450°C 范围内都可得到良好的 6H 多型外延单晶膜。n 型膜掺氮(来自氩气氛),p 型膜掺硼,n 型膜的载流子浓度为 10^{18} 厘米⁻³。p 型膜是在与 n 型膜同样的氩气氛中生长的,因而是重补偿的,电阻率约为 50—300 欧姆·厘米。衬底和外延膜电阻率及载流子浓度用范德保法测量^[10]。n 区和 p 区都用铂熔合结做欧姆接触,电发光二极管的管芯有两种,见图 1。结面积约为 1×1 毫米²。本文中的结大部分测量是在图 1(a) 所示的管芯上进行的。管芯制备工艺详见文献[9]。

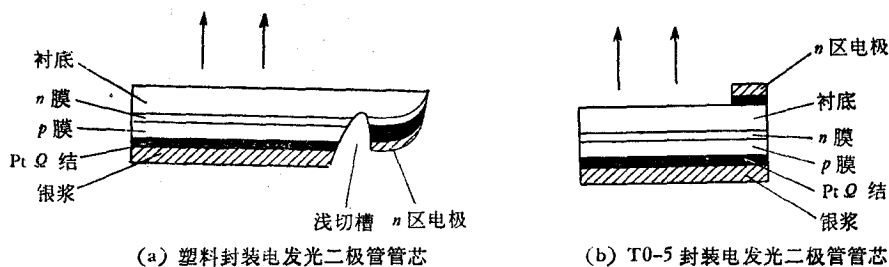


图 1 电发光碳化硅 p-n 结小片

三、电流-电压特性

电流密度-电压特性的测量用通常的直流法。样品架散热良好。 10^{-6} 安以下的电流用 33B 型静电计测量。整个测量是在样品不受光照的情形下完成的。

图 2 显示样品典型的正向 $I-V$ 特性,这些曲线由三个不同区域组成。

I 区 低电流部分,曲线很不规则,这是因为我们的样品未作特殊表面处理,因而漏电流大。

II 区 中间区域是陡峭的直线部份,这个区域的 $I-V$ 特性可由下式表达:

$$I = I_s \cdot \exp \left[\frac{eV}{\eta k T} \right], \quad (1)$$

1) 上海硅酸盐化学与工学研究所徐良琰等同志作过这方面工作。

式中 I_s 为反向饱和电流。对于我们的样品, 由于漏电流大, η 一般在 2—3 之间, 但一些优良的 p-n 结, η 为 2.1—2.2。

III 区 高电流区, $I-V$ 特性偏离指数曲线, 这是 p-n 结的串联电阻所致。对于零偏压结电容很小的样品, $I-V$ 特性具有如下的形式:

$$I \propto (V - V_D)^m, \quad (2)$$

式中 V_D 为 p-n 结的内建势, 对于我们的样品约为 1.9 伏, m 接近 2。

可以清楚地看出, 对一些零偏压结电容小, 亦即结区宽度大的样品, 它们的 $I-V$ 特性在中间电流区 $\eta = 2$ 以及高电流密度下出现二次方区域, 这是 p-i-n 结的典型特性^[11,12], 说明这些样品具有 p-i-n 结的结构。由 $I-V$ 特性得出的这一结果将为第四节的结电容测量进一步证实。电容测量表明: 在 p-n 结结区存在着一个约 0.1—3.0 微米宽的高阻层或称 i 区。碳化硅的少数载流子扩散长度约为: $L_n + L_p = 0.2 - 0.4$ 微米^[7], 因此对于 i 区厚度比 $L_n + L_p$ 大得多的样品其 p-i-n 结的特征将是明显的。例如样品 9406, 高阻层厚度 $W_0 = 3.4$ 微米, 样品 7121, 7123, $W_0 = 0.92$ 微米, 都出现二次方区, m 为 1.9—1.7, m 值偏低的原因可能是我们的样品具有高的串联电阻所致。对于那些高阻层厚度很薄的样品, 未观察到 $\eta = 1$ 的曲线, 说明这些样品中势垒区复合电流仍占优势。

从图 2 还可看到, 图中列出的三条 $I-V$ 曲线对应于三只不同的零偏压结电容的样品, 亦即对应于不同的高阻层厚度, 随着高阻层的厚度增加, 它们对 V 轴的截距增大。这与 Griffiths^[13] 在移动溶剂法制备的碳化硅 p-n 结的结果类似: 一组在不同温度下获得的碳化硅 p-n 结, 随着生长温度升高, $I-V$ 曲线 (中间电流区) 对 V 轴的截距增加。这种现象与 p-i-n 结的结果相符, 即 $I-V$ 曲线的 V 轴截距随 i 区的厚度增加。与我们不同的是移动溶剂法中的 i 区主要是由杂质的互扩散而形成的补偿区。

当 p-n 结施加反向偏压, 结面上可观察到一些蓝白色的发光小点, 或称“蓝斑”。蓝斑的数目和亮度随反向电压的升高而增加。这是由于结区的结构缺陷或杂质在高的结电场下所引起的微等离子体^[14]。

升华外延碳化硅 p-n 结的反向特性见图 3。反向电流既不趋于饱和, 也无明确的击穿点。测试表明, 反向特性一般具有下列形式:

$$I = bV^l, \quad (3)$$

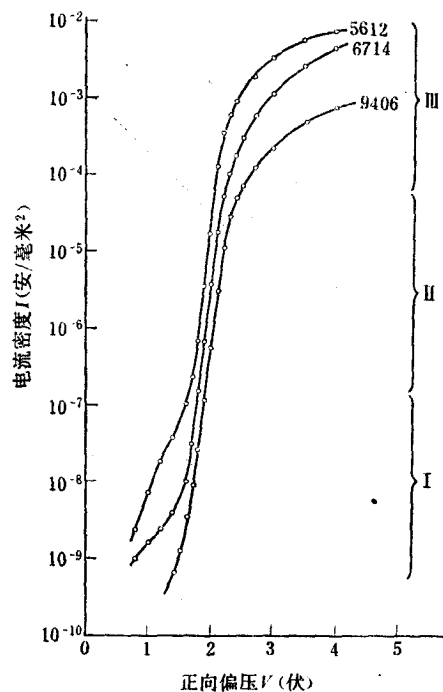


图 2 升华外延碳化硅 p-n 结的正向电流-电压特性 (C_0 : 零偏压结电容 (微微法·毫米⁻²))

样品号	C_0 (微微法·毫米 ⁻²)
5612	840
6714	303
9406	26

式中 b 和 l 为常数,不同样品的 b 和 l 值相差很大. 一些样品在低电压下 $l = 1$, 估计这是样品的表面漏电所致. 随着反向偏压增加, l 可增大到 5; 也有些样品在整个电压范围内 $l > 4$, 反向电流陡峭上升. 大部份样品的反向电流从施加反向偏压一开始就以超过线性的程度增长, 这一事实可能表明结区强电场的重要影响. 若把我们的样品看作 p-i-n 结, 则升华外延碳化硅 p-n 结的零偏压结电场估计可达 10^4 伏·厘米 $^{-1}$, 反向偏置时场强更高. 碳化硅 p-n 结结区存在着大量缺陷和非离化杂质, 它们在能带中形成深能级. 在强结场作用下, 能将它们束缚的电子激发至导带, 并获得较大的能量, 进而诱发载流子倍增效应, 造成高反向电流. 由于各个样品的结区厚度以及缺陷和杂质情况不同, 反向特性也就各不相同.

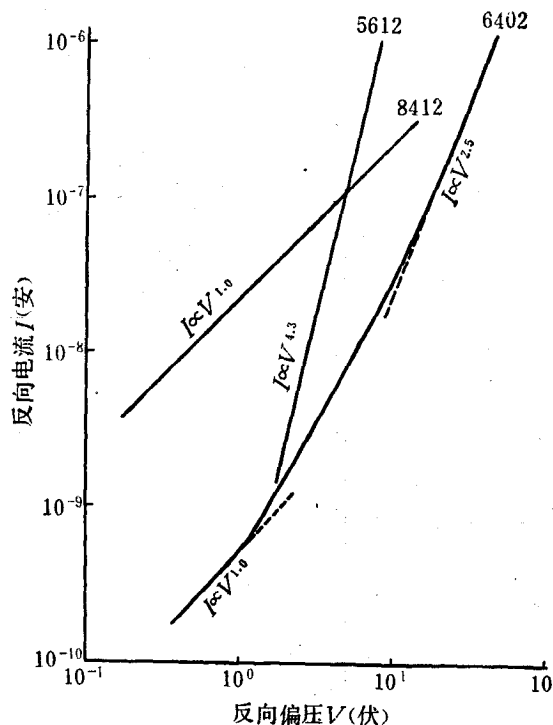


图 3 升华外延碳化硅 p-n 结的反向电流-电压特性

四、电容-电压特性

电容测量用 WQ-5 型万用电桥, 外接标准讯号源, 以 FD-1 型测量放大器指零. 在测量放大器前加滤波器以减少干扰. 测试讯号频率为 10 千赫, 讯号电平 40—60 毫伏. 电桥用 ULRICH 标准电容作了校准.

由于难以确定上述 p-n 结的杂质分布形状, 因而内建势 V_D 的精确测定有困难. 但从电容测量发现, 对于那些零偏压电容很大的样品, 其性质十分接近线性梯度结, $C^{-3}-V$ 关系为一直线. 碳化硅 p-n 结的内建势高, 因此还可以在正向小偏压下进行电容测量. 这样, 就可以对这些 p-n 结作出 $C^{-3}-V$ 曲线 (包括 $V > 0$ 的部份), 并外推得到电压轴上的截距, 求得升华外延碳化硅 p-n 结内建势 V_D 约 1.9 伏.

对一组碳化硅 p-n 结的反向结电容-电

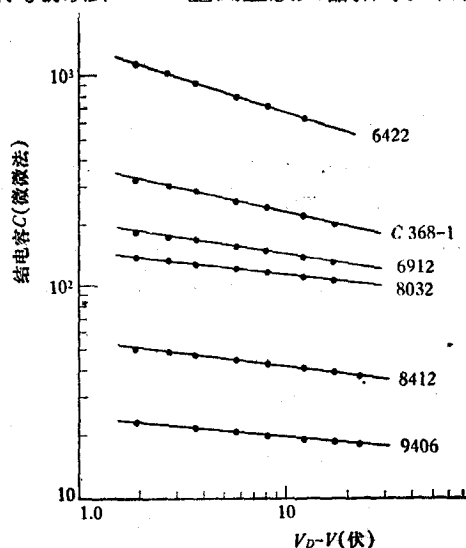


图 4 升华外延碳化硅 p-n 结的电容-电压特性

压特性的测量表明: 单位面积零偏压电容值 C_0 不同的一组样品, 亦即结区厚度 W_D 不同的样品, 随着 W_0 的减小, 电容对电压的依赖关系逐渐减弱, 如图 4 所示. 以 $V_D = 1.9$ 伏计算, 这一组样品的 $\lg C_0 - \lg(V_D - V)$ 呈直线关系,

$$V_D - V \propto C^{-n}, \quad (4)$$

而且 $\lg C - \lg(V_D - V)$ 直线斜率 (n^{-1}) 随 W_0 的增加而减小. 见表 1.

表 1 一组零偏压结电容值不同的样品的比较

样品号	9406	8412	8032	6912	C368-(1)	6422
C_0^* (微微法·毫米 ⁻²)	26	41	124	264	355	933
W_0 (微米)	3.4	2.2	0.73	0.34	0.25	0.096
η	11.2	9.6	9.0	6.9	4.5	3.3

* 这一组样品的结面积由发光面积确定, 室温 26°C.

从表 1 可以看出: 升华外延碳化硅 p-n 结的结区高阻层厚度从 0.1 微米到 3 微米以上, 变化颇宽. 对于 $W_0 = 0.1$ 微米的样品 $\eta^{-1} \rightarrow 1/3$, 实际上已是线性梯度结; 而对于 W_0 比 $L_n + L_p$ 大得多的样品, 电容几乎不随电压变化, 是典型的 p-i-n 结; 但大部份样品介于两者之间, 有一种过渡的性质.

Gramberg^[7] 曾用通常的电容-电压方法估计了结区附近的杂质分布. 在我们的样品中 n 区电子浓度约为 10^{18} 厘米⁻³, 而 p 区空穴浓度根据电阻率估计 (假设空穴迁移率为 10 厘米²·伏⁻¹·秒⁻¹) 约为 10^{16} 厘米⁻³. 空间电荷区主要向 p 区伸展. 因而 p-n 结附近的 p 区杂质浓度可近似由下式表示:

$$1/N_{IA} = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot A}{2} \cdot \frac{\partial C^{-2}}{\partial V}, \quad (5)$$

式中 A 为结面积, ϵ 为介电常数, N_{IA} 为 p 区离化受主杂质的净浓度: $N_{IA} = N_A \cdot (1 - P_A) - N_D$. P_A 为受主能级占据率. 根据(5)式即可由 $C-V$ 曲线粗略地估计杂质浓度. 图 5 给出一只样品在结区附近的杂质分布. 可以看到当 $W_0 < 0.3$ 微米时 N_{IA} 很小, 表明结区附近存在着

一个宽度为 0.3 微米左右的高阻区 (宽度随样品而异). 距离稍远, 杂质浓度急剧升高并趋于饱和. 图 5 表明, 该样品的 p 区离化受主浓度约为 3×10^{17} 厘米⁻³.

下面对由 $I-V$ 特性和 $C-V$ 特性所得结果作粗略讨论.

碳化硅半导体禁带宽度高达 2.9 电子伏, 因此即使在制备 p-n 结的外延生长温度下, 仍然未进入完全的本征激发, 从而使已形成的 p-n 结中保留有一定的内建电场, 引起杂质

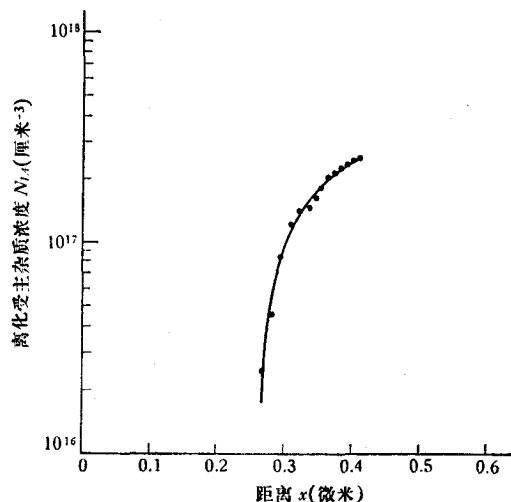


图 5 样品 6714 结区附近的离化杂质浓度分布

离子的漂移,所以在碳化硅气相升华外延过程中,同时存在着杂质扩散和离子漂移两种作用. 根据碳化硅中硼和氮的扩散数据^[15,16],氮的扩散在这里可以忽略,何况 p 区和 n 区的氮杂质浓度本来就大致相同. 同样,根据爱因斯坦关系 $\mu = (e/kT)D$,氮离子的漂移迁移率也将是很小的. 所以只需考虑硼离子的作用. 离化受主的质点漂移流如下:

$$J = J_{\text{漂移}} + J_{\text{扩散}} = \mu_A E_x N_A + D_A \cdot \frac{dN_A}{dx}, \quad (6)$$

式中 μ_A 和 D_A 分别为离化受主的迁移率和扩散系数, E_x 为结区内建电场. 设 W 为结区厚度,则

$$E_x = V_D/W. \quad (7)$$

设 n 区掺杂浓度 N_D , 由于升华外延过程中以氩气氛中残留的氮作 n 型掺杂剂,而 p 型和 n 型是在同样的氩气氛中生长的^[9], 所以 p 区至少具有补偿施主杂质 N_D , 因此 p 区的饱和受主浓度为 $N_A - N_D$. 接触电势近似为

$$\begin{aligned} V_D = \phi_{Fp} + |\phi_{Fn}| &= \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_A - N_D}{n_i} + \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_D}{n_i} \\ &= \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_D(N_A - N_D)}{n_i^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 ϕ_{Fp} 和 ϕ_{Fn} 分别为 p 区和 n 区平衡费米能级和本征费米能级之差, n_i 是本征激发载流子浓度. 将(7),(8)式代入(6)式

$$\frac{J_{\text{漂移}}}{J_{\text{扩散}}} = \frac{N_A \cdot \ln \frac{N_D \cdot (N_A - N_D)}{n_i^2}}{W \cdot \frac{dN_A}{dx}}. \quad (9)$$

如上所述,在升华外延过程中容许的温度范围宽,以及 2000°C 以上测温和控温的困难,因此不同炉次的温度起伏较大,再加上不同时期、不同炉子中实际温度、生长时间、降温制度的变化,这样就不难理解为何由同一种升华外延碳化硅工艺获得的 p-n 结的结构会有很大差异.

由(9)式看出,外延温度的影响是重要的. 简单的计算表明: 在外延温度范围内(2100—2350°C), 相应的 n_i 值可变化 20 倍. 外延温度高, 内建电场减弱, 扩散起主要作用, 形成扩散结; 低的外延温度, 形成 p-i-n 结; 其次, 外延结束后的降温过程对结构也有明显影响, 高的外延温度并迅速降温可形成扩散结, 而缓慢地降温往往会加强 p-i-n 结的倾向; 此外, 杂质浓度高, 有利于形成 p-i-n 结, 当然还需视 dN_A/dx 的数值而定.

另外, 根据硅中锂离子漂移制作 p-i-n 结的经验, 进行了碳化硅离子漂移的初步试验: 400°C, 反向约 30 伏, 累计 20 小时, 结果 p-n 结的反向电流降低了约一个数量级, 说明是有效果的.

五、电发光亮度-电流关系

碳化硅电发光早在 1907 年就已发现并被广泛地研究. 由于是间接跃迁材料, 早期的电发光内部效率仅为 10^{-6} 光子/电子. 目前内部效率已可达 10^{-3} 光子/电子以上^[17]. 这

里研究的升华外延碳化硅 p-n 结已用于生产电发光二极管和数码管^[10]。发黄光, 极少数发绿光。

亮度-电流关系的测量用 M12FSQ35 型光电倍增管检测, 样品加直流偏流, 为防止样品电流引起的温升, 用铜块作散热样品架。亮度-电流曲线如图 6 所示, 亮度 $B \propto I^s$ 。发黄光的样品, 低电流密度下 s 接近于 1, 随着电流密度增加, 逐渐变化到 $s \approx 0.5$, 这是通过杂质中心复合的标志。发绿光的 p-n 结在低电流下 $s \approx 2.5$, 电流密度增加, 亮度略趋饱和。碳化硅 p-n 结的绿光波长正处于人眼敏感区, 它有比黄光高得多的效率, 而且可能具有不同的发光机制。

还测量了碳化硅电发光二极管在不同环境温度下的亮度变化。从 -25 — $+60^\circ\text{C}$, 在相同的电流密度下, 亮度逐渐增加, 这意味着注入发光效率的提高。估计这与载流子浓度的增加有关。因为在 100°C 以下无论是 n 型或 p 型碳化硅的杂质离化都是非饱和的。

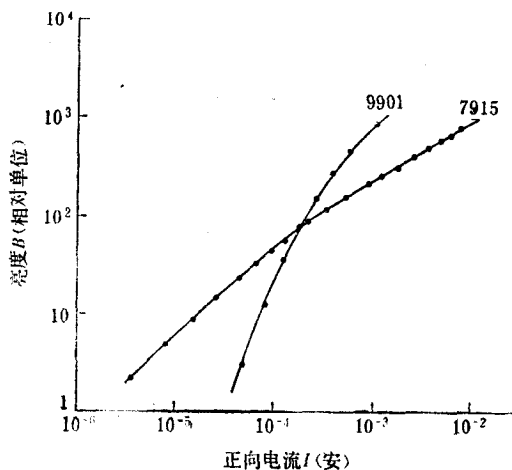


图 6 升华外延碳化硅 p-n 结正向电发光亮度-电流曲线

六、正向电发光的光谱分布

用 SP900 型火焰分光光度计测量电发光光谱分布。碳化硅 p-n 结正向电流密度 $1 \text{ 安} \cdot \text{厘米}^{-2}$, 室温 21°C , 图 7 为 p-n 结电发光光谱。显然, 在 4300 — 7400 埃范围内只存在单一的发光峰, 峰值约 5850 埃, 发绿光的 p-n 结的峰值为 5290 埃。根据文献^[18]给出的碳化硅各种多型体的禁带宽度数据, 与这里得到的结果进行对比, 见表 2。表中 λ_p , E_p 为电发光峰值波长及对应的光子能量。由表 2 可见, ΔE_g 和 ΔE_p 十分接近, 因此绿光 p-n 结可能是由碳化硅 4H 多型体产生的。这是因为在工业生产碳化硅原料的电炉中取来的碳化硅晶片中常常混有极少量 4H 碳化硅 (n 型)。在这种衬底上有可能产生 4H 多型的碳化硅外延膜。有时在发黄光的 p-n 结上夹杂有一些发绿光的区域或斑点。对这些“绿斑”的 X 射线检查也证明这些区域属于

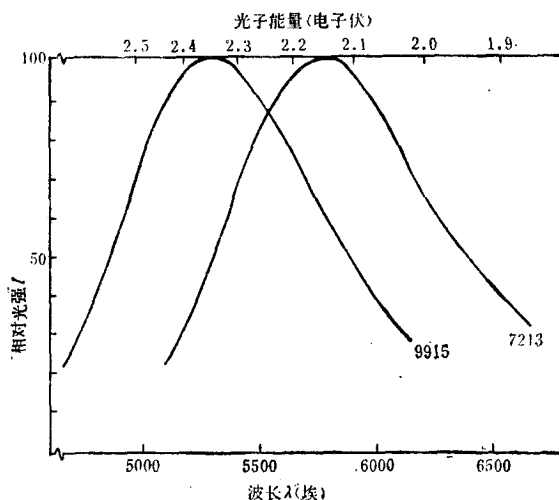


图 7 升华外延碳化硅 p-n 结正向电发光光谱分布

硅 (n 型)。在这种衬底上有可能产生 4H 多型的碳化硅外延膜。有时在发黄光的 p-n 结上夹杂有一些发绿光的区域或斑点。对这些“绿斑”的 X 射线检查也证明这些区域属于

表 2 碳化硅不同多型体禁带宽度和对应的电发光峰值位置对照

多型	E_g (电子伏)	λ_p (埃)	$E_p = h/\lambda_p$ (电子伏)	ΔE_g (电子伏)	ΔE_p (电子伏)
6H	3.023	5850	2.120	0.242	0.225
4H	3.265	5290	2.345		

4H 多型体。顺便指出,以工业碳化硅原料中的黑色碳化硅晶片作外延衬底获得的 p-n 结,发绿光的几率较高,可达 10% 左右。

七、脉冲和交流激励下的电发光

以矩形脉冲激励电发光 p-n 结,用 M12FQS35 型光电倍增管检测,光脉冲以 SBT-5

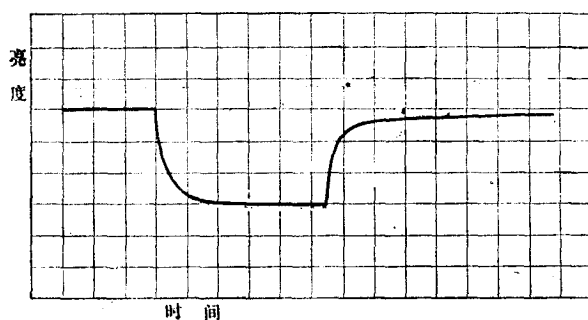


图 8 脉冲激励情况下升华外延碳化硅 p-n 结电发光波形

型同步示波器显示。由图 8 可见,光的衰减由两部份组成,即迅速下降的部份和缓慢消失的部份,前一部份 < 1 微秒,后一部份常常延伸几十微秒。对此现象可作如下解释:碳化硅的非平衡载流子寿命极短,当激励脉冲消失后,电子和空穴迅即被结电场扫出结区并复合,它对应于光衰减的快速部分;如前所述,

碳化硅 p-n 结的结区存在着大量缺陷

和杂质,它们中的一部份可起陷阱作用。当非平衡载流子注入时,它们俘获了一些少数载流子。注入停止后,它们将俘获的少数载流子逐渐释放出来,由于它们在能级中的位置较深,激发几率小,因而构成缓慢消失的余辉。

研究了碳化硅 p-n 结的调制特性。对加有直流偏流的 p-n 结以正弦信号调制,其典型光输出-调制频率曲线见图 9。高频下光输出的下降是由结电容的旁路引起的。但 10 千

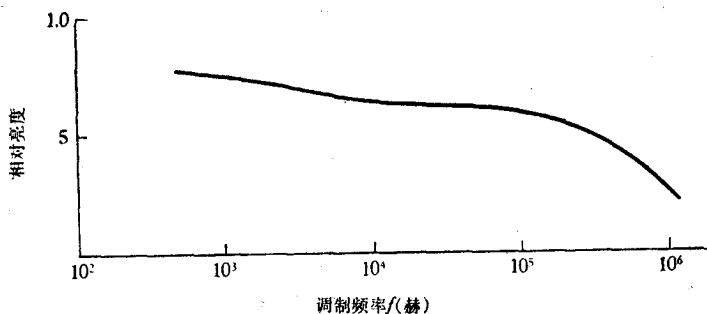


图 9 交流激励情况下升华外延碳化硅 p-n 结电发光的调制特性

赫以下亮度降低的原因尚不清楚。直流偏流增加则可以在更高的频率下工作,一些优良的 p-n 结在较高直流偏流下 ($2 \text{ 安} \cdot \text{厘米}^{-2}$), 1 兆赫下的亮度可以达到 10 千赫时亮度的 70% 或更高。

此外,还进行了升华外延碳化硅 p-n 结光伏效应的初步试验。以 p 型晶片作衬底,外延 p 膜,再生长一层极薄的 n 型膜,采用图 1(b) 所示的管芯形式,以高压汞灯作光源,开路光电压可达 1.65 伏。

八、结 语

综上所述, 对升华外延碳化硅 p-n 结的 $I-V$ 特性及 $C-V$ 特性的分析表明: 随着外延生长条件的不同, 这种 p-n 结的结构可以在一个相当宽的范围内变化. 按照各样品结区高阻层的厚度不同, 其结构可以从近于通常的扩散结直到典型的 p-i-n 结. 大多数样品则介于这两者之间, 具有一种过渡的性质. 造成这种差别的原因, 我们认为是外延温度下离子漂移和杂质扩散的同时存在, 从而使外延生长条件对 p-n 结结区的杂质分布有强烈影响. 由于我们测试的样品是从制作碳化硅电发光二极管的外延炉的不同时期、不同炉次、不同炉子中任意选取的, 而其间外延温度、生长时间、降温制度是时有变化的, 所以这些 p-n 结在结构上的显著差异是不难理解的. 了解升华外延碳化硅 p-n 结的这一特点对于碳化硅半导体结型器件的研制是很有意义的. 它使我们可以根据不同器件对 p-n 结结构的要求, 有目的地改变外延温度、生长时间、降温制度以及掺杂情况来获得所需要的 p-n 结结构.

对升华外延碳化硅 p-n 结的正向电发光的研究表明: 发黄光的碳化硅 p-n 结的正向电发光是属于通过杂质能级的复合辐射, 发光效率随温度升高而增加, 它可以在脉冲激励下工作, 有比较好的高频调制性能以及良好的稳定性. 因此虽然它发光亮度不高, 但有它独特之处, 应予注意. 特别是在外延生长中偶尔获得的发绿光的 p-n 结, 可能是 4H 多型体所致, 具有线性好、效率高的优点. 因而掌握发绿光的碳化硅 p-n 结的工艺仍然是一个很有实际意义的课题.

这项工作是在谭浩然同志指导下进行的. 原碳化硅研究组的同志参加了有关的晶体生长、外延、器件工艺等工作. p-n 结正向电发光的光谱分布是由梁家鏊同志完成的.

参 考 文 献

- [1] J. A. Lely, *Ber. Deut. Keram. Ges.*, **32**(1955), 229.
- [2] W. V. Muench and I. Pfaffemeder, *J. Appl. Phys.*, **48**(1977), 4831.
- [3] W. V. Muench and I. Pettenpaul, *J. Appl. Phys.*, **48**(1977), 4823.
- [4] *Electronic Design*, May **24** (1974), 26.
- [5] L. Patrick, *J. Appl. Phys.*, **28**(1957), 765.
- [6] C. A. A. J. Greebe, *Philips Res. Repts. Suppl.*, **1**(1963).
- [7] G. Gramberg, H. Königer, *Solid-State electronics*, **15**(1972), 285.
- [8] E. M. Pell, *J. Appl. Phys.*, **31**(1960), 291.
- [9] 硅酸盐研究所一室, 碳化硅电发光二极管的研究, 上海电子学会 1965 年电子设备晶体管化年会论文.
- [10] 冯锡淇等, *物理学报*, **22** (1966), 967.
- [11] A. Herlet, *Solid-State electronics*, **11**(1968), 717.
- [12] R. N. Hall, *Proc. I. R. E.*, **40**(1968), 1512.
- [13] L. B. Griffiths, *J. Appl. Phys.*, **36**(1965), 571.
- [14] C. Van. Opdorp and J. Vrakking, *J. Appl. Phys.*, **40**(1969), 2320.
- [15] D. W. Yarbrough, *Solid State Tech.*, **11**(11) (1968), 23.
- [16] L. J. Kroko and A. G. Milnes, *Solid-State electronics*, **9**(1966), 1125.
- [17] R. M. Potter, J. M. Blank and A. Addamiano, *J. Appl. Phys.*, **40**(1969), 2253.
- [18] L. Patrick, D. R. Hamilton and W. D. Choyke, *Phys. Rev.*, **132**(1963), 2023.

THE CHARACTERISTICS OF EPITAXIAL p-n JUNCTIONS GROWN BY METHOD OF SILICON CARBIDE CRYSTALS SUBLIMATION

FENG XI-QI LUO BIN-ZHANG

(Shanghai Institute of Chemistry and Technology of Silicates, Academia Sinica)

ABSTRACT

Measurements of the voltage-current characteristics and space-charge capacitance have been made on the epitaxial p-n junctions grown by method of silicon carbide crystals sublimation. An analysis of the forward voltage-current and voltage-capacitance characteristics shows that the structures of the p-n junction may vary over a quite wide range, from typical p-n junctions to nearly linear graded junctions resulted from different epitaxial growth parameters, but most of them have intermediate structures. The effect of epitaxial growth parameters on structures of p-n junctions is briefly discussed.

In addition, The brightness-current characteristics, the spectral distribution of electroluminescence of forward biased epitaxial p-n junctions, and their performance under pulse and a.c. excitations are also described.