

文章编号: 1672-8785(2006)10-0005-06

C-V 法测量 pn 结杂质浓度分布的基本原理及应用

何 波^{1,2}, 史衍丽², 徐 静³

(1. 昆明理工大学光电子新材料研究所, 云南昆明 650051; 2. 昆明物理研究所, 云南昆明 650223; 3. 济南大学材料学院, 山东济南 250022)

摘 要: 全面地介绍了 pn 结 C-V 测量法的基本原理、测试设备及条件。利用 pn 结反向偏压时的电容特性推导了有效杂质浓度随深度分布的计算公式及突变结和线性缓变结的 $\frac{1}{C^2} - V$ 和 $\frac{1}{C^3} - V$ 关系图。应用该原理计算、分析了 IN5401 整流二极管 pn 结的特性及杂质浓度的纵向分布。

关键词: C-V 测量法; 杂质浓度分布; pn 结; 势垒电容; 离子注入

中图分类号: 04723 **文献标识码:** A

Principle of the C-V Method for Measuring Impurity Distribution in Junction Diodes and Its Application

HE Bo^{1,2}, SHI Yan-li², XU Jing³

(1. Institute of Advanced Materials for Photo-Electronics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China; 2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China; 3. Department of Materials and Engineering, Jinan University, Ji'nan 250022, China)

Abstract: The basic principle, test equipment and test condition of the capacity-voltage method for measuring the impurity distribution in junction diodes are presented completely. The formula for calculating the effective impurity concentration in the abrupt junction, the linearly graded junction and the random junction is deduced by using the capacity characteristics obtained when the reverse bias are applied to the p-n junction. Finally, the impurity concentration distribution in an IN5401 diode is calculated using the method and the characteristics of the p-n junction are analyzed.

Key words: C-V measurement; impurity concentration distribution; p-n junction; potential barrier capacity; Ion implantation

1 引言

用电容-电压(C-V)法测量杂质浓度分布,就是利用 pn 结或金属-半导体肖特基势垒在反向偏压时的电容特性(其势垒电容随所加电压而发生变化),通过电容-电压变化关系找到肖特基势垒二极管中半导体一侧的掺杂浓度分布或

pn 结二极管中低掺杂区的杂质浓度剖面分布。大量晶体管和集成电路是在外延片上制造的。准确检测外延层掺杂浓度及其分布是制造合格晶体管和集成电路的必要条件。C-V 测量法比通常采用的四探针法和三探针法等具有更大的优点。虽然扩散电阻法也能测量纵向分布,但它

收稿日期: 2006-05-07

作者简介: 何波(1981—),男,广西南宁人,昆明理工大学 2004 级硕士研究生,主要研究方向为半导体光电子材料及器件。

需对样品进行磨角。C-V测量法具有测量简单、方便、快速、经济、稳定可靠等优点，而且对样品是非破坏性的，所以应用比较广泛^[1]，是一种重要的半导体器件检测手段。以下对其基本原理及具体检测实例作一介绍。

2 测试基本原理

2.1 对突变结

根据pn结电容理论，若假设耗尽层成立，存在下列关系：

$$\text{势垒电容 } C = A \sqrt{\frac{e\epsilon_0\epsilon_s N^*}{2(V_D - V)}}, \quad N^* = \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \text{ 为约化浓度, } A \text{ 为结区面积 }^{[2]}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{C^2} = \frac{2(V_D - V)}{eA^2\epsilon_0\epsilon_s N^*}$$

即对突变结来说， $\frac{1}{C^2}$ 与 V 呈线性关系（见图1）。

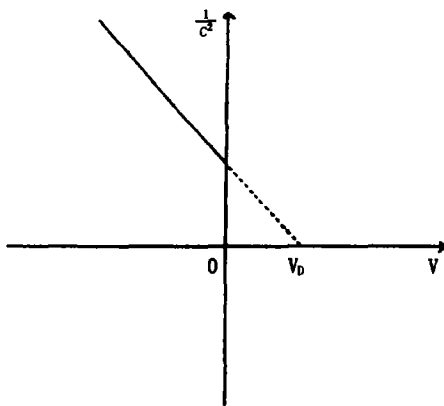


图1 突变结的 $\frac{1}{C^2} - V$ 线性曲线

直线延长线与 V 轴的交截点，即为结的内建电位 V_D ，由直线斜率（等于 $\frac{2}{eA^2\epsilon_0\epsilon_s N^*}$ ）可求出 N^* 。当pn结为单边突变结时，约化浓度可用低浓度一侧的掺杂浓度代替。

2.2 对线性缓变结

势垒电容 $C = A \left(\frac{\epsilon_0^2 \epsilon_s^2 G}{12(V_D - V)} \right)^{1/3}$ ， G 为杂质浓度梯度^[2]

$$\Rightarrow \frac{1}{C^3} = \frac{12(V_D - V)}{eA^2(\epsilon_0\epsilon_s)^2 G}$$

即对线性缓变结来说， $\frac{1}{C^3}$ 与 V 呈直线关系（见图2）。

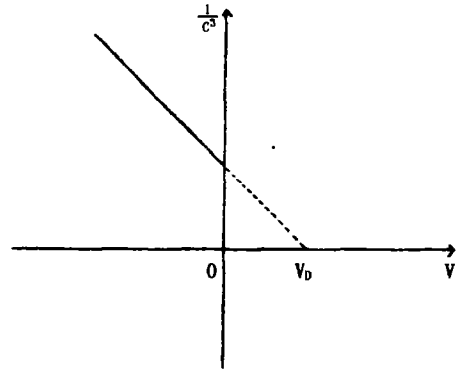


图2 线性缓变结的 $\frac{1}{C^3} - V$ 曲线

由直线斜率（等于 $\frac{12}{eA^2(\epsilon_0\epsilon_s)^2 G}$ ）和截距可求出杂质浓度梯度 G 和 V_D 。

pn结电容等于势垒电容和扩散电容之和。正向偏压时，由于正向电流 J_D 较大，扩散电容 $C_D = \frac{q}{kT}\tau J_D$ 大于势垒电容。反偏时，流过pn结的是很小的反向饱和电流，扩散电容也就很小，这时势垒电容起主要作用^[3]。所以，C-V测量法须加反向偏压， V_D 通过外推延长线与 V 轴的交点获得。

2.3 既非突变结又非线性缓变结

对既非突变结又非线性缓变结（ $\frac{1}{C^2} - V$ ， $\frac{1}{C^3} - V$ 都非直线）的情况，即对任意杂质浓度分布，有两种推导方法。

推导方法一

当反向偏置电压变化为 dV 时，耗尽层宽度 W 也随之变化，则电荷的变化量为 dQ 。值得注意的是，该电荷的变化只发生在耗尽层两端，而耗尽层内部的电荷不发生变化（在耗尽层 n 侧的变化为 $+dQ$ ，在 p 侧的变化为 $-dQ$ ）。由于该电荷变化量 dQ 的存在，耗尽层中存在着相应的电场变化。

由电磁学，

$$QD = \epsilon_0\epsilon_s E = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

$$\therefore dE = \frac{dQ}{A\epsilon_0\epsilon_s} \quad (2)$$

这个电场的电力线是从耗尽层的 n 侧指向 p 侧。因此，相应电势变化为

$$dV = WdE = \frac{WdQ}{A\epsilon_0\epsilon_s} \quad (3)$$

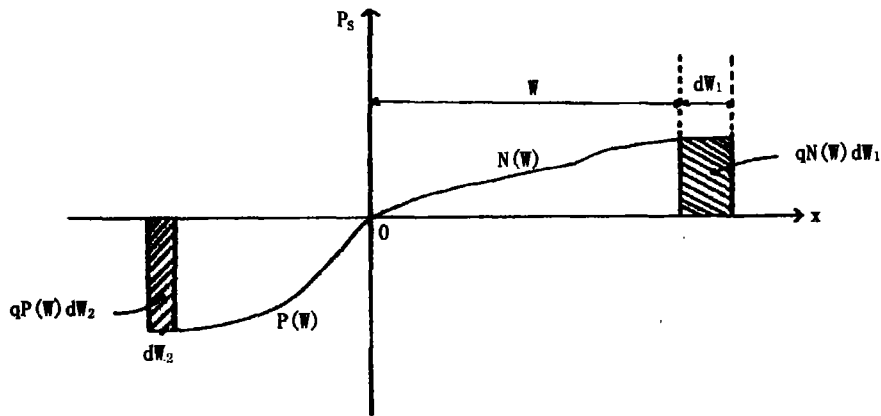


图 3 空间电荷 (有效杂质) 任意分布的 pn 结

由上述两式可推导出电容为

$$C = \frac{dQ}{dV} = \frac{A\epsilon_0\epsilon_s}{W} \Rightarrow W = \frac{A\epsilon_0\epsilon_s}{C} \quad (4)$$

上述推导过程中没有设定耗尽层中的杂质分布情况, 即式 (4) 在杂质的任意分布情况下均成立^[4]。

我们考虑一个任意杂质分布的 pn 结, 如图 3 所示。外加反向偏压 dV 引起的耗尽层宽度增量 $dW = dW_1 + dW_2$, 且由电荷守恒,

$$qN(W)dW_1 = qP(W)dW_2$$

$$\begin{aligned} \therefore N(W)dW_1 &= P(W)dW_2 = P(W)(dW - dW_1) \\ &= P(W)dW - P(W)dW_1 \\ \Rightarrow dW_1 &= \frac{P(W)dW}{N(W) + P(W)} \end{aligned}$$

耗尽层电荷增量

$$\begin{aligned} dQ &= qAN(W)dW_1 = \frac{qAN(W)P(W)dW}{N(W) + P(W)} \\ &= qAN^*(W)dW \end{aligned}$$

式中, $N^*(W)$ 为有效掺杂浓度, 其定义为 $N^*(W) = \left[\frac{1}{P(W)} + \frac{1}{N(W)} \right]^{-1}$, 则

$$\begin{aligned} dV &= WdE = \frac{WdQ}{A\epsilon_0\epsilon_s} = \frac{qAN^*(W)WdW}{A\epsilon_0\epsilon_s} \\ &= \frac{qN^*(W)dW^2}{2\epsilon_0\epsilon_s} \quad (5) \end{aligned}$$

把式 (4) 代入式 (5) 得

$$dV = \frac{qN^*(W)d\left(\frac{A\epsilon_0\epsilon_s}{C}\right)^2}{2\epsilon_0\epsilon_s} = \frac{qN^*(W)A^2\epsilon_0\epsilon_s d\left(\frac{1}{C^2}\right)}{2}$$

$$= \frac{qN^*(W)A^2\epsilon_0\epsilon_s dC}{C^3}$$

$$\Rightarrow N^*(W) = \frac{2}{qA^2\epsilon_0\epsilon_s} \left[\frac{d\left(\frac{1}{C^2}\right)}{dV} \right]^{-1}$$

$$\text{或 } N^*(W) = \frac{C^3}{qA^2\epsilon_0\epsilon_s} \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1} \quad (6)$$

注意: 若 pn 结为单边结, 则 $N^*(W)$ 为低掺杂区浓度分布 (例如 p^+n 结, 则 $N^*(W) = N(W)$)。

这样, 对单边结 (例如 p^+n 结), 我们若测出电容对反向偏压的 C-V 曲线, 并逐点求斜率 $\frac{dC}{dV}$, 由式 (6) 即可求出 $N(W)$, 同时由式 (4) 可得到相应的 W (深度)。通过一系列这样的方法可得到不同深度上的杂质浓度分布。

推导方法二

因为势垒电容 $C = \frac{A\epsilon_0\epsilon_s}{W}$ 在杂质任意分布情况下均成立, 该式与导体厚度为 W 的平板电容器的标准电容公式相同, 而且该平板电容器的极板间距就是势垒区的宽度 W 。这是因为在耗尽层内部不发生电荷的变化, 耗尽层仅当作介电常数为 ϵ 的导体工作^[4]。所以总电荷 $Q = -qN^*(W)WA$, 又 $QW = \frac{A\epsilon_0\epsilon_s}{C}$

$$\therefore Q = -qN^*(W) \frac{\epsilon_0\epsilon_s A^2}{C} = -qN^*(W)\epsilon_0\epsilon_s A^2 \frac{1}{C}$$

由微分电容定义:

$$\begin{aligned} C &= \frac{dQ}{dV} = -qN^*(W)\epsilon_0\epsilon_s A^2 \left(-\frac{1}{C^2} \right) \frac{dC}{dV} \\ &= qN^*(W)\epsilon_0\epsilon_s A^2 \frac{1}{C^2} \frac{dC}{dV} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow N^*(W) = \frac{C^3}{qA^2\epsilon_0\epsilon_s} \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1}$$

该式与推导方法一的结果完全相同。

3 测试设备及条件

3.1 测试设备

美国惠普公司的 Agilent 4155C 型半导体测试分析仪。

3.2 测试条件

(1) 测试频率：为了使结电容具有一定的 Q 值，并满足足够的信噪比等要求，一般把测试频率选择为 1MHz。

(2) 高频测试信号大小：一般选择小于室温 $\frac{kT}{q}$ 的数值，即小于 26mV。

(3) 势垒面积：为了减小边电容与杂散电容对测试的影响，通常要求势垒面积大于 10^{-4}cm^2 [7]。

4 测试结果及分析

用 Agilent 4155C 型半导体测试分析系统，在测试频率为 1MHz、高频信号大小为 20mV 的测试条件下，测量 4 支市售 IN5401 硅整流二极管 (p^+n 结) 的 $C-V$ 曲线，它们的结面积均为 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ 。其中 3 支编号为 1、2、4 的二极管的 $C-V$ 、 $\frac{1}{C^2}-V$ 、 $\frac{1}{C^3}-V$ 和 $I-V$ 曲线大致相同，如图 4 所示。

显然， $\frac{1}{C^2}-V$ 曲线为线性，这与厂家提供的用离子注入形成的 p^+n 单边突变结的信息相符。由直线外推延长线与 V 轴交点的截距可确定其自建势 $V_D = 0.6\text{V}$ ；由直线斜率可求出低掺杂 n 区有效杂质浓度为 $2 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 。

在 4 个样品中，3 号二极管的 $C-V$ 、 $\frac{1}{C^2}-V$ 、 $\frac{1}{C^3}-V$ 和 $I-V$ 曲线如图 5 所示。

其中 $\frac{1}{C^2}-V$ 和 $\frac{1}{C^3}-V$ 曲线均非直线，这说明该二极管既非突变结，也非线性缓变结。我们由

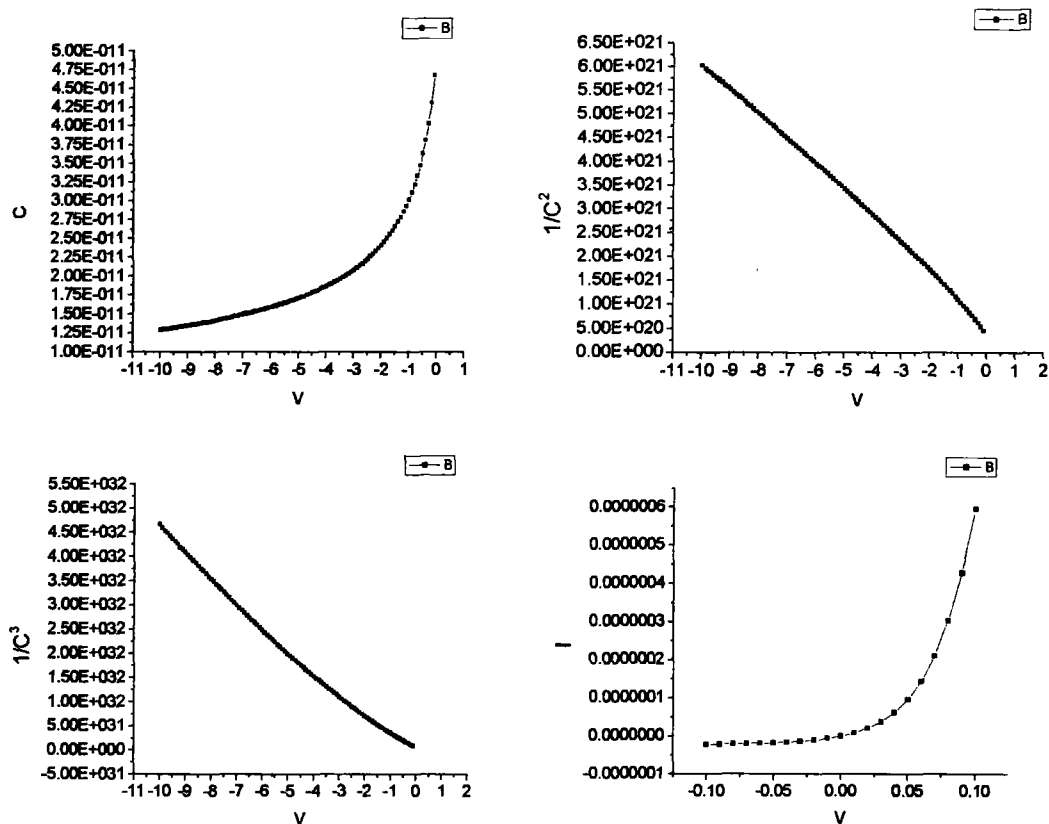


图 4 1 号二极管的 $C-V$ 、 $\frac{1}{C^2}-V$ 、 $\frac{1}{C^3}-V$ 和 $I-V$ 特性曲线

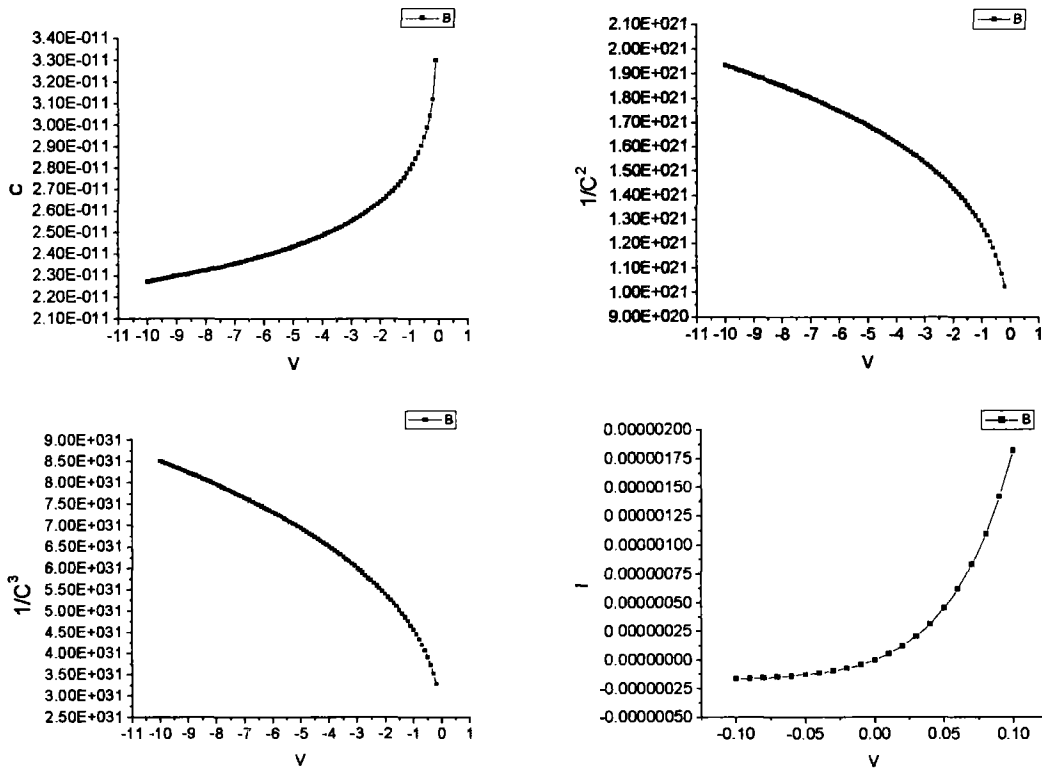


图 5 3 号二极管的 C-V、 $\frac{1}{C^2}$ -V、 $\frac{1}{C^3}$ -V 和 I-V 曲线

p⁺n 单边结公式

$$\begin{cases} N_{D\text{有效}}(W) = \frac{C^3}{qA^2\epsilon_0\epsilon_s} \left(\frac{dC}{dV}\right)^{-1} \\ W = \frac{A\epsilon_0\epsilon_s}{C} \end{cases}$$

对 C-V 曲线逐点求斜率 $\frac{dC}{dV}$, 计算 $N_{D\text{有效}}(W)$, 并同时计算相应的深度 W, 分别作为纵坐标和横坐标。

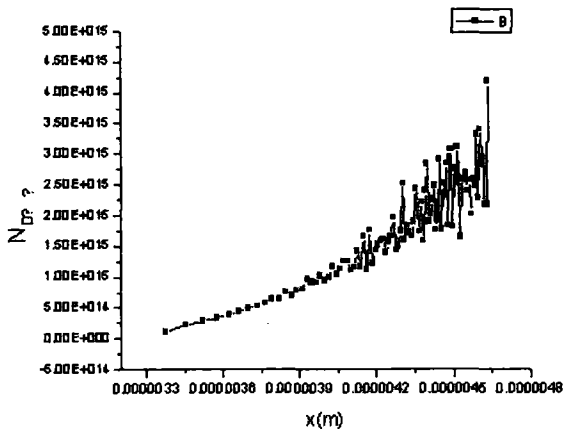


图 6 3 号二极管的有效施主杂质浓度分布

图 6 所示为 n 区 (空间电荷层附近) [8] 不同深度的有效杂质分布。考虑有效施主和受主浓度在 pn 结两边分别为 N_D-N_A (n 型侧) 和 N_A-N_D (P 型侧)。这是两种杂质补偿的结果 [2]。

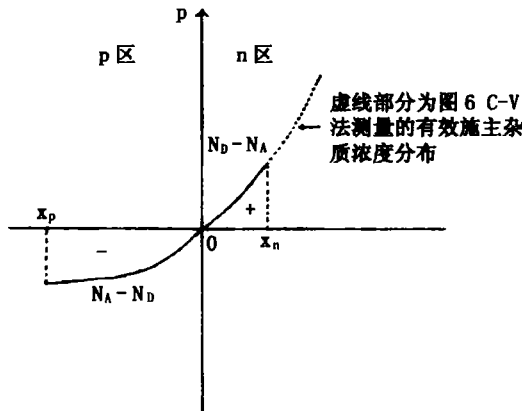
杂质分布如图 7 所示, 3 号二极管的杂质浓度满足高斯分布

$$n(x) = \frac{S}{\sqrt{2\pi}VR_P} e^{-\frac{(x-R_P)^2}{2VR_P^2}}$$

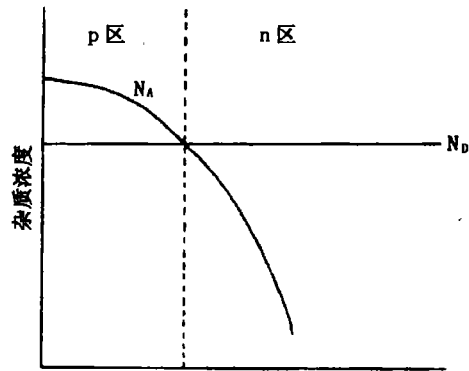
其投影射程标准偏差 VR_P 比其他三个突变结二极管的大 (1、2、4 号二极管的杂质浓度高斯分布的投影射程标准偏差 VR_P 小, 为典型的离子注入单边突变结)。3 号二极管的 I-V 特性也比 1、2、4 号突变结二极管的差, 反向饱和电流大。这与离子注入成结后的退火工艺有关。

5 结束语

通过测量 pn 结 C-V 特性曲线, 作出 $\frac{1}{C^2}$ -V, $\frac{1}{C^3}$ -V 关系图, 可判断是突变结还是线性缓变结; 由



(a) 有效杂质浓度纵向分布



(b) 杂质浓度纵向分布

图 7

$$\begin{cases} N^*(W) = \frac{C^3}{qA^2\epsilon_0\epsilon_s} \left(\frac{dC}{dV}\right)^{-1} \\ W = \frac{A\epsilon_0\epsilon_s}{C} \end{cases}$$

逐点求 $N^*(W)$ 和 W 并分别作为纵坐标和横坐标, 通过分析可得杂质浓度随深度的分布. C-V 测量法对分析 pn 结特性、改进工艺、提高成品率及成结工艺机制的研究都具有深远的实际意义.

致谢昆明物理研究所 4 室协作此实验研究的工作人员李欣、赵晋云.

参考文献

[1] 北京市辐射中心, 北京师范大学, 等. 离子注入原理与技术 [M]. 北京: 北京出版社, 1982.
 [2] 叶良修. 半导体物理学(上册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.

[3] 郝跃, 贾新章, 吴玉广. 微电子概论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
 [4] 中乌坚志郎. 半导体工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
 [5] 陆慧庆, 赵军, 李向阳, 等. 低能离子束轰击碲镉汞制备 pn 结电学特性的研究 [J]. 红外与毫米波学报, 1998, (2): 22.
 [6] J Hilibrand, R D Gold. Determination of the impurity in junction diodes from capacitance-voltage measurements [J]. RCA REVIVE, 1960, (5): 248.
 [7] 中国科学院半导体研究所理化分析中心研究室. 半导体的检测与分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.
 [8] 张艺, 沈为民. 固体电子学基础 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005.
 [9] 施敏. 半导体器件物理与工艺 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.

国外专利介绍

热红外成像器件及其制作方法

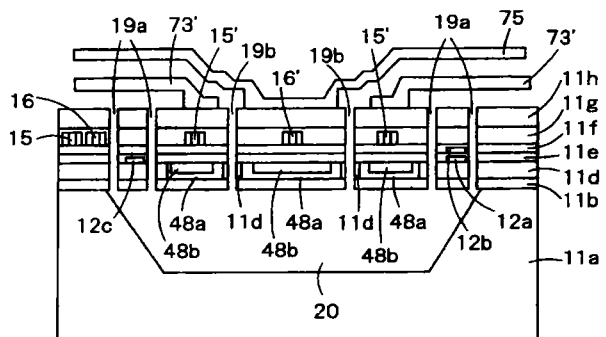
美国专利 US7067810

(2006 年 6 月 27 日授权)

目前市场上出售的热红外图像传感器大多为测辐射热计型和热释电型. 这些热红外图像传感器都是用其热敏部件吸收来自目标的红外辐射, 然后根据电阻变化和电容变化来探测热敏部件的温度上升的. 因此, 用于支撑热敏部件的支柱都有一个特点, 即截面小、长度长. 然而, 当支撑腿比较长时, 被吸收的红外辐射会转换成热量, 这样便会减小用于将热量转换成电信号的热敏部件的面积. 因此, 对于支撑腿的长度和热敏元件的面积, 人们需要作权衡考虑.

本发明提供一种通过防止非敏感面积的增加获得优良成像性能的热红外成像器件.

本专利说明书共 20 页, 其中有 12 张插图.



高 编 译