

碲镉汞器件光敏元电容测试与分析

任士远^{1,2}, 林 春^{1,3}, 魏彦锋¹, 周松敏¹, 王 溪¹,
郭慧君¹, 陈 路¹, 丁瑞军^{1,3}, 何 力^{1,3}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 上海科技大学 信息科学与技术学院, 上海 210210)

摘要: 报道了液氮温度下对 HgCdTe 器件进行电容测试的方法。标定了仪器寄生电容以及杜瓦寄生电容, 并利用该测试结果计算得到 PN 结区附近的载流子浓度和相应的深度等数据。对比了碲镉汞常规 PN 结器件与雪崩光电二极管 (APD) 器件的耗尽层宽度以及 N 区载流子浓度。

关键词: HgCdTe; 电容; 载流子浓度; 缓变 PN 结

中图分类号: TN305 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2019)05-0413-05

Capacitance Measurement and Analysis of Mercury Cadmium Telluride Photosensitive Elements

REN Shiyuan^{1,2}, LIN Chun^{1,3}, WEI Yanfeng¹, ZHOU Songmin¹,
WANG Xi¹, GUO Huijun¹, CHEN Lu¹, DING Ruijun^{1,3}, HE Li^{1,3}

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Material and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Shanghai Tech University, School of Information Science and Technology, Shanghai 210210, China)

Abstract: A method for measuring the capacitance of HgCdTe devices at liquid nitrogen temperature was discussed in this article. The instrument and the parasitic capacitance of the dewar were both calibrated, after which the carrier concentration near the PN junction and its corresponding depth were computed from C-V curves. Finally, the width of the depletion layer and the carrier concentration in the N region of a HgCdTe conventional PN junction device were compared to those of an avalanche photodiode (APD) device.

Key words: HgCdTe, capacitance, carrier concentration, grading PN Junction

0 引言

碲镉汞探测器在红外探测领域有着非常重要的位置, 而其性能也与碲镉汞光敏元电容有着密切的联系: ①读出电路输入级对光敏元电容有要求; ②电容的充放电过程会产生额外的噪声, 影响焦平面性能^[1]; ③电容的大小也会影响探测器的响应时间。因此如何准确测量出碲镉汞光敏元电容是有必要且有意义的, 同时也可以利用测得的电容电压变化曲线来计算得到载流子浓度等数据, 并用来分析载流子浓度与雪崩光电二极管 (APD) 的增益以及增益归一化的暗电流的关系, 有助于我们进一步分析 APD 的相关特性。

1 实验方法

碲镉汞光敏元本质上是一个 PN 结, 本篇文章中采用的是 n-on-p 平面结^[2], 是在 P 型外延层上通过离子注入的形式扩散形成的缓变 PN 结。作为一个 PN 结, 它有整流效应, 但是它又包含着破坏整流特性的因素。这个因素就是 PN 结的电容。PN 结电容包括势垒电容和扩散电容两部分, 本篇文章中重点关注反偏电压情况下的电容, 即主要是势垒电容^[3]。

1.1 仪器使用方法和原理

在实验中, 采用测试设备来进行电容-电压 (C-V) 曲线的测试, 扫描频率为 1 kHz~10 MHz, 扫描电压范围: ± 30 V。

收稿日期: 2019-02-17; 修订日期: 2019-04-18.

作者简介: 任士远 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事碲镉汞光敏元电容的研究工作。E-mail: 957330302@qq.com.

通信作者: 林春 (1973-), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事半导体红外光电子器件制备和测试技术研究。E-mail: chun_lin@mail.sitp.ac.cn.

仪器测试原理：在 pn 结器件中 $Z = R + \frac{1}{j\omega C}$

式中： Z 为电抗； R 为阻抗； ω 为测试频率； C 为电容。

先设定测试频率 f ，则 $\omega = 2\pi f$ ，然后在待测器件 (Device under testing, DUT) 两端加上小的交变电压，通过交变电压表测出 DUT 两端的电压 U_{AC} ，交变电流表测出 DUT 电流 I_{DUT} ，因为所测试的 PN 结器件都是在零偏及反偏电压下工作，所以电阻很大以至于可相当于无限大电阻，则 I_{DUT} 可视为容抗部分产生的交变电流。

则：
$$C = \frac{I_{DUT}}{\omega U_{AC}} = \frac{I_{DUT}}{2\pi f U_{AC}}$$

通过以上的过程，Keithley 4200 设备就可以将待测器件的电容值测量并计算出来，同时可以改变直流偏置电压，便得到 C 随 V 变化的 C - V 曲线。

1.2 样品的制备

常规器件的制备：在 CdZnTe 衬底的 (111) 面上液相外延生长汞空位 P 型的 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 外延薄膜，之后通过 B^+ (硼离子) 注入形成 N 区。值得注意的是，硼离子的注入并不是作为掺杂原子，而是为了形成汞填隙并扩散最终形成 N 区，扩散区与 P 区补偿形成 N⁻ 区，最终是 N⁻ 区与 P 型外延层来形成缓变 PN 结，如图 1 所示。

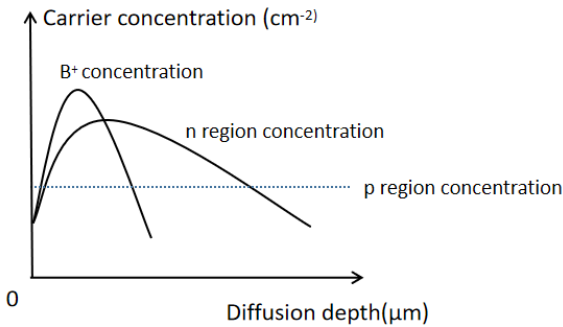


图 1 B^+ (硼离子) 注入形成汞填隙并扩散形成 N 区

Fig.1 B^+ (boron ion) is injected to form the mercury-filled and diffused to form the N-region

最后制备金电极和钢柱即可完成样品的制备，光敏元形状为边长 $240\ \mu\text{m}$ 的正方形，图 2 为 HgCdTe 光电二极管的 PN 结 (1 号样品) 示意图。

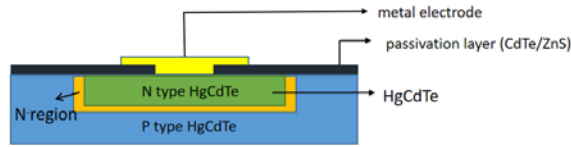


图 2 常规碲镉汞器件

Fig.2 Conventional mercury cadmium telluride device

雪崩光电二极管 (Avalanche photodiode, APD) 的制备：与常规器件的工艺相似，只是在硼离子注入之后增加了退火工艺来形成更宽的 N⁻ 区，最后金电极和钢柱。图 3 为 HgCdTe 雪崩光电二极管 (2 号样品) 的示意图，光敏元形状为边长 $240\ \mu\text{m}$ 的正方形。

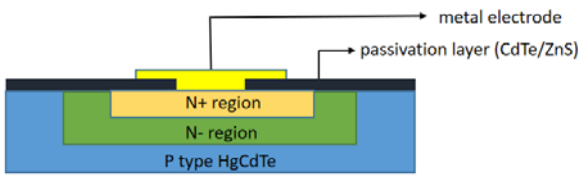


图 3 碲镉汞雪崩光电二极管器件

Fig.3 Mercury cadmium telluride photodiode device

表 1 为两个样品的具体参数。

1.3 样品的测试

1.3.1 测试仪器的校准

测试开始前需要先保证测试系统的准确性，避免因系统的原因导致误差。于是对 Keithley 配套提供的标准电容元件进行了测试来验证仪器准确性，测试时所用的测试频率为 1 MHz，我们的测试结果 $47.464\ \text{pF}$ 与标准标签所标定的 $47.623\ \text{pF}$ 相差 $0.16\ \text{pF}$ ，是一个很小的仪器误差。我们判断差值来自仪器的引线以及仪器内部的寄生电容，因此在后续测试过程中要考虑到这 $0.16\ \text{pF}$ 的误差并尽量减小误差对我们测量的影响，比如通过测量较大面积的较大电容值的器件来使得误差可以忽略不计。

常规碲镉汞器件的光敏元电容大小与面积有关，大致在几 pF ~几十 pF 之间，(边长 $90\ \mu\text{m}$ 的正方形的光敏元电容大小大致为 $10\ \text{pF}$)，因此在待测器件的电容大小为仪器系统寄生电容大小的 1~2 个数量级的时候，我们可以将仪器系统的寄生电容误差忽略不计。

表 1 2 个样品的具体参数表

Table 1 List of specific parameters for 2 samples

	Cd component	Cut-off wavelength @ 77 K/ μm	P-type epitaxial layer doping concentration / cm^{-2}	Photosensitive area/ μm^2
Sample No. 1 (conventional device)	0.296	5.22	8.48×10^{15}	57600
Sample No. 2 (APD device)	0.302	5.03	7.18×10^{15}	57600

1.3.2 杜瓦本身电容的校准

碲镉汞器件需要工作在液氮温度下（77K），而杜瓦是低温研究的一种较理想的容器，因此需要将芯片封装到杜瓦里进行测试。而这样在测试中便引入了杜瓦的电容，所以我们需要标定杜瓦的电容并最终消除其带来的误差。

我们不键压芯片，直接通过转接头来测试得到了空杜瓦的电容 $C_0=7.7\text{ pF}$ ，并通过下面的实验来证明转接头与空杜瓦的电容总和与我们要测试的光敏元电容是并联关系，这样在之后的测试结果中可以简单的减去转接头加空的杜瓦电容。

实验如下：首先将商用的 FDS025 型的硅基光电二极管焊接在宝石片上作为一个整体，不通过杜瓦直接用 Keithley 4200 设备来测试得到其电容 C_1 ，然后将二极管+宝石片这个整体键压在杜瓦上并加装转接头测试得到其电容 C_2 （图 4），那么转接头加杜瓦本身的电容 $C=C_2-C_1$ 。



图4 键压宝石片后的杜瓦

Fig.4 Dewar after bonding gem tablet

通过测试，宝石片加二极管的总电容 $C_1=2.84\text{ pF}$ ，通过杜瓦和转接头测试最终得到结果 $C_2=10.48\text{ pF}$ ，那么杜瓦与转接头所带来的电容为 $C=C_2-C_1=7.64\text{ pF}$ 。 C 约等于 C_0 ，说明光敏元电容与转接头杜瓦电容是并联关系（图 5）。因此在之后的测试中我们使用同一个杜瓦和转接头，则在测试结果中直接减去杜瓦和转接头带来的电容即可。

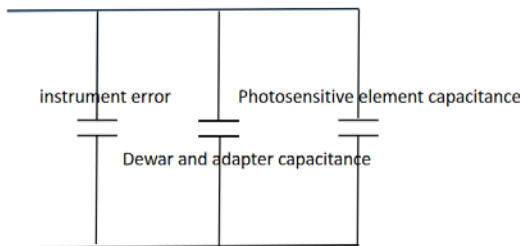


图5 光敏元电容与其他寄生电容为并联关系

Fig.5 The relationship between photosensitive element capacitance and other parasitic capacitance is parallel

2 实验结果与分析

2.1 常规碲镉汞 pn 结器件的分析

首先制备了中波碲镉汞常规 pn 结器件即 1 号样品（组分 $x=0.29$ ，截止波长 $5.225\text{ }\mu\text{m}@77\text{K}$ ），并进行了测试分析（测试频率 1 MHz ），其中的电容数值是减去了杜瓦和转接头的寄生电容以及仪器寄生电容的结果。

由图 6 可知加零偏电压时的电容为 92.8 pF ，随着反偏电压的增大，耗尽层宽度增大，导致电容减小，符合预期。

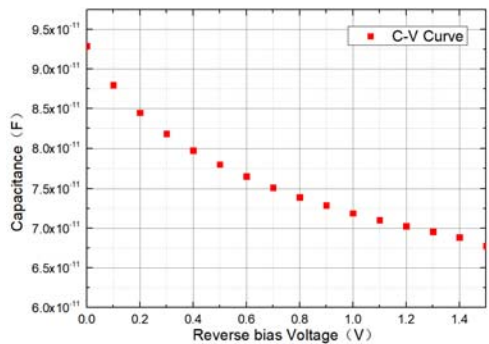


图6 CV 曲线图 Fig.6 CV curve

之后想要通过 CV 曲线来计算得到碲镉汞 PN 结内部的载流子浓度分布，但是通过作图发现 $1/C^2-V$ 曲线和 $1/C^3-V$ 曲线都不是直线，说明光敏元既不是突变结也不是线性缓变结，因此无法使用传统的公式来直接计算其载流子浓度。前人报道了一种可以计算任意杂质浓度分布 PN 结的载流子浓度的方法^[4]：

$$C = \frac{dQ}{dV} = \frac{A\epsilon_0\epsilon_s}{W} \Rightarrow W = \frac{A\epsilon_0\epsilon_s}{C} \tag{1}$$

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

式中： W 为耗尽层宽度； $N^*(W)$ 为有效掺杂浓度，其

定义为 $N^*(W) = \left[\frac{1}{P(W)} + \frac{1}{N(W)} \right]^{-1}$ 。

这样若测出电容对反向偏压的 CV 曲线，并逐点求出斜率 dC/dV ，由式(2)即可求出 $N^*(W)$ ，并可以进一步求出 $N(W)$ ，同时由式(1)得到相应的耗尽层宽度 W 。利用以上原理和公式对 DRSTechnologies 的结果^[5]进行了计算，所得的 N 区载流子浓度和文章中给出的相一致，说明计算公式是正确的。

通过上述公式计算得到了常规器件 $N^*(W)$ 以及耗尽层宽度 W ，并做出了耗尽层随反偏电压变化关系图。

由图7可以看出,随着反偏电压的增大,耗尽层宽度 W 也在增大,符合半导体基本理论。得到 N^* 以及 W 之后,可以进一步计算 N 区浓度以及对应的 N 区耗尽层宽度:

$$N^* = \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \Rightarrow N_D = \frac{N^* \cdot N_A}{N_A - N^*}$$

$$W = W_n + W_p, \frac{W_n}{W_p} = \frac{N_A}{N_D} \Rightarrow W_n = \frac{W \cdot N_A}{N_A + N_D}$$

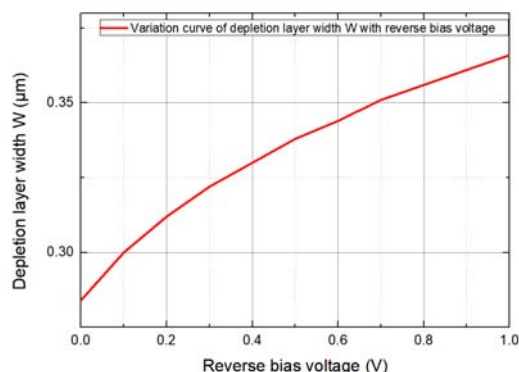


图7 耗尽层宽度随反偏电压关系图

Fig.7 Depletion layer width versus inverse bias voltage

同时液相外延生长的 P 型衬底的浓度是已知的 $8.48 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$,在计算过程中近似将 $8.48 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 当作 N_A ,由以上公式可求出 N_D 以及 W_n ,并做出 N_D 随 W_n 变化图,就可以得到器件 PN 结区向 N 区扩展的深度以及该深度处的 N 区载流子浓度(图8)。可以看出,随着向 N 区扩展深度 W_n 的增加, N 区载流子浓度呈上升趋势。

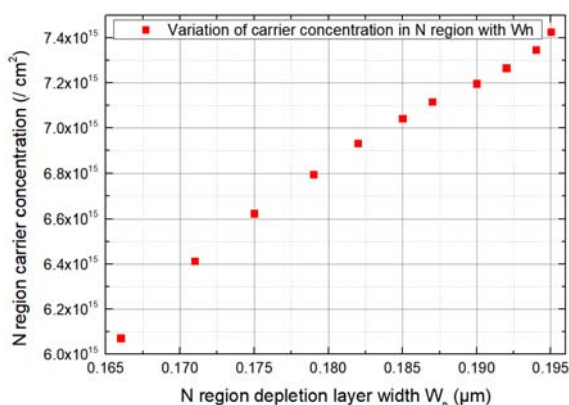


图8 N 区载流子浓度随 W_n 变化关系

Fig.8 Variation curve of carrier concentration in N Region with W_n

综上,通过 CV 法测量并计算得到了 N 区载流子浓度和其在结区扩散的深度。与对样品分层腐蚀并逐层进行霍尔效应来获得载流子浓度的剥层霍尔方法相比,简单方便快捷,稳定可靠,且对样品是非破坏性的,因此 CV 测量法对分析碲镉汞 PN 结特性,改进工艺等会有深远的实际意义。

2.2 常规器件与雪崩光电二极管(APD)器件的对比

HgCdTe 雪崩光电二极管常用的结构是平面 PIN 型结构。通常 I 层是指在 PN 结中间加入一个本征层(I)而形成。对于实际的 HgCdTe 材料几乎无法得到其本征层,所以在实际 APD 器件中一般用浅掺杂的 N^- 或 P^- 层替代。本篇文章中在 P 型碲镉汞上注入形成 N 区之后,进行退火来形成更宽的低掺杂的 N^- 区,从而降低电场强度、增加倍增区长度并降低隧穿电流,得到 $P/N^-/N^+$ 的结构 APD 器件(2号样品)。运用同样的计算方法可以得到耗尽层宽度, N^- 区载流子浓度以及其对应的结区深度(图9,图10)。

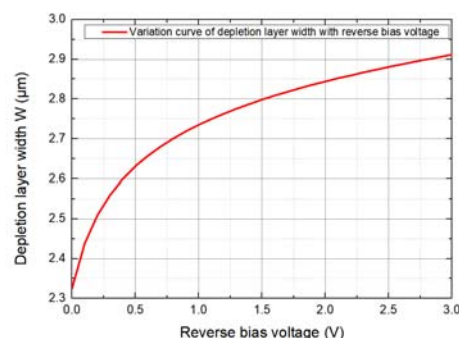


图9 APD 器件耗尽层宽度 W 随反偏电压变化图

Fig.9 Chart of depletion layer width W with reverse bias voltage of APD devices

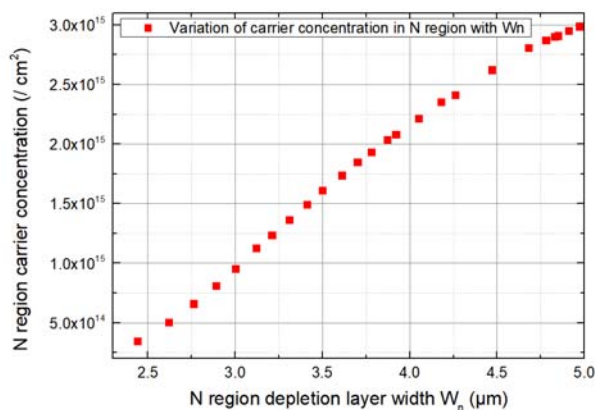


图10 APD 器件 N 区载流子浓度随 W_n (N 区耗尽层宽度)变化图

Fig.10 Chart of carrier concentration in N region with W_n (width of depletion layer in N region) of APD devices

将常规器件跟 APD 器件相对比,由表2可以看出在相同面积之下, APD 的耗尽层宽度远大于常规器件,说明退火可以展宽耗尽层。而 APD 器件的 N 区载流子浓度则较低,也说明了退火可以使得汞填隙扩散而导致 N 区载流子浓度降低。

表2 碲镉汞 APD 器件和常规器件对比表
Table 2 Comparisons of HgCdTe APD device with
conventional device

	HgCdTe APD device	Conventional HgCdTe device
N-region carrier concentration/cm ⁻²	3.47×10 ¹⁴	6.07×10 ¹⁵
Depletion layer width/μm	2.33	0.28

3 结束语

本文报道了液氮温度下对 HgCdTe 器件进行电容测试的方法，并对仪器误差和杜瓦寄生电容进行了标定。通过对 CV 曲线的分析，得到耗尽层宽度以及 N 区载流子浓度：常规碲镉汞器件耗尽层宽度 0.28 μm，N⁻区载流子浓度 6.07×10¹⁵ cm⁻²；碲镉汞 APD 器件耗尽层宽度 2.33 μm，N⁻区载流子浓度 3.47×10¹⁴ cm⁻²。通过计算即可得到载流子浓度与相应的结区深度的关系，与剥层霍尔等方法相比更为简单便捷，在实际应用中会有较好的意义。

参考文献:

[1] 吴昊, 秦水介. 碲锌镉探测器低噪声读出电路的设计[J]. 电子技术与软件工程, 2017(5): 112-113.
WU Hao, QIN Shuijie. Design of low noise readout circuit for cadmium zinc tellurium detector[J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2017(5): 112-113.

[2] 杨健荣. 碲镉汞材料物理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
YANG Jianrong. *Physics and Technology of Mercury Cadmium Tellurium*[M]. Beijing: national Defense Industry Press, 2012.

[3] Lucia M L, Hernandez-Rojas J L, Leon C, et al. Capacitance measurements of pn junctions: depletion layer and diffusion capacitance contributions[J]. *European Journal of Physics*, 1993, **14**(2): 86.

[4] 何波, 史衍丽, 徐静. C-V 法测量 pn 结杂质浓度分布的基本原理及应用[J]. 红外, 2006, **27**(10): 5-10.
HE Bo, SHI Yanli, XU Jing. The basic principle and Application of C-V method for measuring impurity concentration Distribution in pn junctions[J]. *Infrared*, 2006, **27**(10): 5-10.

[5] Beck J, Scritchfield R, Sullivan B, et al. Performance and modeling of the MWIR HgCdTe electron avalanche photodiode[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, **38**(8): 1579-1592.