

碲镉汞 p-on-n 光伏器件优化掺杂的理论计算*

李向阳 方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所, 传感技术国家重点实验室, 上海, 200083)

摘要 从理论上考虑了碲镉汞长波光敏二极管的主要电流机制, 并采用合适的参数对 R_0A 进行了计算. 结果表明, 由于隧道电流的限制, 对于一定的衬底浓度, 选择 p 区掺杂的浓度不宜过大, 反之亦然. 计算得到了优化掺杂浓度与衬底浓度的关系和相应的 R_0A 值.

关键词 碲镉汞光电二极管, p-on-n 型, 优化设计.

THEORETICAL CALCULATION OF DOPING OPTIMIZATION FOR p-on-n HgCdTe PHOTODIODE*

LI Xiang-Yang FANG Jia-Xiong

(National State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract By considering the main current mechanism in the long-wavelength HgCdTe photodiode, theoretical calculation of R_0A was done by choosing proper parameters. Calculations show that, given n side substrate concentration, the p side doping concentration should not be too large on considering the limitation of the tunneling current, and vice versa. The relation of optimal concentration with the substrate concentration was calculated and the corresponding R_0A was also obtained.

Key words HgCdTe photodiode, p-on-n type, optimization.

引言

碲镉汞($Hg_{1-x}Cd_xTe$)是长波红外探测器的最重要的材料. 对于长波的光伏型红外探测器, p-on-n 型光伏器件能达到更高的探测率. 为了在器件制备中能够提供指导, 我们对碲镉汞 p-on-n 光伏器件的理论计算和优化设计进行了研究, 并得到了有意义的结果.

1 理论公式

对于热平衡条件下碲镉汞光伏器件中的电流种类已有很多人进行了分析, 归纳起来主要有^[1]: (1) n 区和 p 区的扩散电流, (2) 势垒区的产生-复合电流, (3) 隧道电流, 包括直接隧道电流及通过深能级中心的间接隧道电流, (4) 表面漏电, (5) 背景辐射所激发的载流子的光电流, (6) 通过位错线, 晶界面或孪晶面等产生的短路电流. 其中前 4 种是与器件设

计和工艺水平相关的电流, 因为对于背景激发的光电流可以采用冷屏蔽的方法予以减弱, 而提高材料的性能可以减少位错等材料缺陷. 忽略表面漏电的影响, 我们对前 3 种电流的基本特性, 以及它们对器件的影响进行讨论.

1.1 扩散电流限制的零偏压电阻面积之积为

$$(R_0A)_D = \left(\frac{1}{(R_0A)_{n\infty}} + \frac{1}{(R_0A)_{p\infty}} \right)^{-1} \\ = \frac{(K_B T)^{1/2}}{q^{3/2} n_i^2} \left[\frac{1}{N_D} \left(\frac{\mu_h}{\tau_h} \right)^{1/2} + \frac{1}{N_A} \left(\frac{\mu_e}{\tau_e} \right)^{1/2} \right]^{-1} \quad (1)$$

1.2 势垒区的产生-复合电流限制的零偏压电阻面积之积为

$$(R_0A)_{g-r} = \frac{\sqrt{\tau_{n0}\tau_{p0}} V_{bi}}{qn_i w f(b)} \quad (2)$$

1.3 直接隧道电流密度为

* 国家自然科学基金(批准号 19805014)资助项目
稿件收到日期 2001-06-25, 修改稿收到日期 2001-09-28

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 19805014)
Received 2001-06-25, revised 2001-09-28

$$J_{Dr} = \frac{q^3 E V}{4\pi^2 \hbar^2} \left(\frac{2m^*}{E_g} \right)^{1/2} \times \exp \left[- \frac{4(2m^*)^{1/2} E_g^{3/2}}{3q\hbar E} \right]. \quad (3)$$

1.4 间接隧道电流密度为

$$J_{IT} = qN_r \omega_c N_c, \quad (4)$$

$$\omega_c N_c = \frac{\pi^2 q m^* E M^2}{h^3 (E_g - E_i)} \times \exp \left[- \frac{(m^*/2)^{1/2} E_g^{3/2} F(a)}{2qE\hbar} \right]. \quad (5)$$

以上式(1)~(5)中的符号具有通常的意义,公式详细推导过程见文献[1~3]

2 碲镉汞光电二极管性能优化设计理论

利用以上公式,考虑碲镉汞 p-on-n 光伏器件的特性,选取适当参数进行了计算.计算表明:材料衬底浓度和掺杂浓度对器件的 R_0A 作用是相互影响的.

在实际的器件工艺中,我们选择较为合适的片子进行加工,不同衬底浓度的片子其相应的工艺参数是不同的,最受影响的工艺参数应当是 p 区的掺杂浓度.为了分析两者之间的相互关系,我们利用前面的公式,对它们取不同值时得到的 R_0A 进行了计算.计算中我们选取温度为 77K, p 区的厚度为 $1\mu\text{m}$, n 区的厚度为 $9\mu\text{m}$, 表面复合速度为 $1 \times 10^4 \text{cm/s}$, 有些参数的离散性特别大,如少数寿命和少数迁移率.考虑到我们的计算不是理论极限计算,因此对于这些参数,我们选择合适的数值进行计算^[4]:组份 $x=0.22$, p 区的少子的寿命 1ns, 少数迁移率取为 $1 \times 10^3 \text{cm}^2/\text{Vs}$; n 区的电子浓度为 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, 少数寿命取为 0.1 μs , 少数迁移率取为 $300 \text{cm}^2/\text{Vs}$.图 1 是计算得到的 R_0A 随掺杂浓度的变化结果.首先让我们来看扩散电流限制的

$(R_0A)_D$ (见图 1 中曲线 D), 一般在计算由扩散电流限制的 R_0A 积时, 仅仅考虑衬底的贡献.这是因为, 从 $(R_0A)_D$ 的计算公式可见, 如果假设 $(\mu_e/\tau_e) \approx (\mu_h/\tau_h)$, 由于 N_A 一般远大于 N_D , 所以总的结果是由衬底决定.然而在 p-on-n 型器件中, 由于 p 区的少数寿命非常低, 同时少数迁移率又较 n 区少子的高, 所以使得来自 p 区和 n 区两方面的扩散电流对 R_0A 都有贡献, 这就导致了图 1 中的结果: 在衬底 n 区的浓度一定的情况下, 器件的 R_0A 在掺杂浓度比较低时随掺杂浓度的提高而增加, 当掺杂浓度较高时, 趋势变平缓.另外, 图 1 中标明的长寿命曲线 (long $\tau_p D$) 是假设 p 区少数寿命是 10ns 的扩散电流限制结果.显然, 结果附合以上分析.

对于产生-复合电流, 我们选取了 $\tau_{r0} = \tau_{p0} = 40\text{ns}$ 和 $f(b) = 1$ 进行计算, 从图 1 中的曲线 (g-r) 可以看出, 产生-复合电流限制的 $(R_0A)_{g-r}$ 随掺杂浓度的变化很小.由式(2)可知, 变化主要来自内建电场和耗尽层随掺杂浓度的变化.需要注意的是, 我们忽略了耗尽层中的产生复合中心的浓度随着掺杂浓度不同的变化.如果考虑产生-复合中心的浓度随掺杂浓度的增大而增大的话, 当掺杂浓度变化时, 产生-复合限制的 $(R_0A)_{g-r}$ 就可能出现负增长.

对于间接隧道电流, 我们假设陷阱能级处于禁带中心, 陷阱中心浓度是有效掺杂浓度的 0.1%.从图 1 中的曲线 (TAT) 可以看出, 随着掺杂浓度提高, 间接隧道电流限制的 $(R_0A)_{TAT}$ 急剧下降.这是由于随着掺杂浓度的提高, 结区的电场场强增加, 导致隧道电流的概率增加, 同时由于陷阱中心的浓度也有所提高, 使得隧道电流大大增加.同样地由于电场的增强, 直接隧道电流 (BBT) 也存在相似的趋势, 只是由于在零偏压附近的直接隧道电流很小, 因而由它决定的 $(R_0A)_{BBT}$ 一般比较大, 但是在反偏压和更低温度下, 它的贡献会增大.

上述 4 种机构共同作用的结果 $(R_0A)_{\text{Total}}$ 可由式(6)计算得到

$$\frac{1}{(R_0A)_{\text{Total}}} = \frac{1}{(R_0A)_D} + \frac{1}{(R_0A)_{g-r}} + \frac{1}{(R_0A)_{TAT}} + \frac{1}{(R_0A)_{BBT}}. \quad (6)$$

从计算结果(图 1 中的曲线 Total) 可以看出, 4 种机构共同作用的结果是: 总 R_0A 随掺杂浓度变化出现了峰值, 这说明在上述一些假定和参数情况下有一个较合适的掺杂浓度.

利用式(1)~(6), 我们计算了不同衬底浓度下

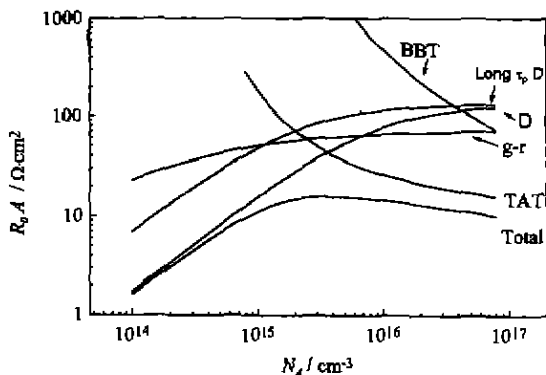


图 1 不同机制限制的 R_0A 随掺杂浓度的变化
Fig.1 R_0A limited by different mechanisms vs. doping concentration

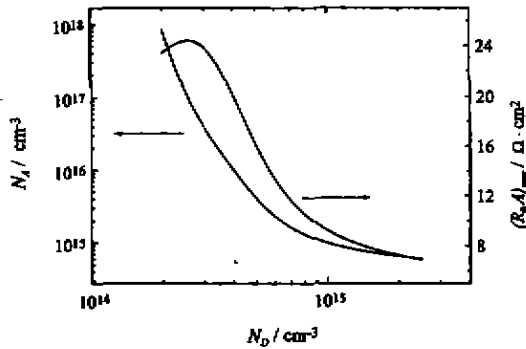


图2 碲镉汞的合适掺杂 N_A 与相应的最大 R_0A 随衬底浓度 N_D 的变化 ($x=0.22$)

Fig.2 Doping concentration N_A of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x=0.22$) varies with substrate concentration N_D to get corresponding maximum R_0A

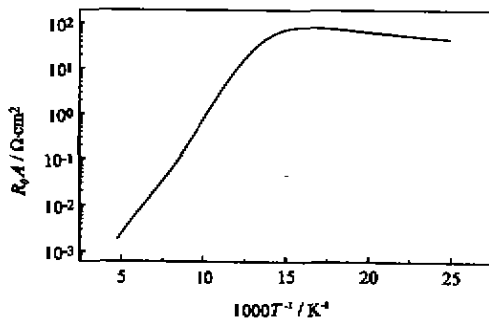


图3 合适掺杂浓度的器件的 R_0A 随温度的变化
Fig.3 The temperature dependence of R_0A of appropriately doped devices

的合适掺杂浓度,以及相应的 R_0A (见图2)。另外,我们还计算了合适掺杂下的 R_0A 随温度的变化,计算中考虑了禁带宽度以及各种载流子浓度的变化带来的影响,其结果见图3。计算得到的 R_0A 随温

度的变化趋势与通常测量得到的结果是一致的,即:在高温段,器件的电阻随着温度的降低而指数地升高,在低温段,器件的电阻变化很小,两段的转化点温度称为转变温度。从图3可以看出,合适掺杂的结果使转变温度正好在工作温度 77K 附近。

3 结论

对碲镉汞 p-on-n 光伏器件的理论计算表明:由于隧道电流的限制,对于一定的衬底浓度下,选择 p 区掺杂的浓度不宜过大,同时,对于 p-on-n 器件,尽管 p 区的掺杂浓度较高,但由于 p 区的少数寿命短,使得 p 区的少数扩散电流限制的 R_0A 仍能与衬底决定的 R_0A 相比拟,这使得 p 区的掺杂浓度有一个优化值。计算得到了优化掺杂浓度与衬底浓度的关系和相应的 R_0A 。在 p 区掺杂的浓度一定的情况下,衬底浓度不宜过大,适当选取电子浓度较低的衬底可以获得较大的优质因子 R_0A 。对于合适掺杂的器件,其电阻随温度变化曲线的转变温度在工作温度 77K 附近。

REFERENCES

- [1] WANG Shou-Wu, TANG Ding-Yuan, TONG Fei-Ming. *Research and Progress in Semiconductor Devices (II)*. Beijing: Science Press (王守武,汤定元,童斐明. 半导体器件研究与进展(二)). 北京:科学出版社,1991,1
- [2] Willardson R K, Beer A C. *Semiconductors and Semimetals*. New York: Academic Press, 1981, 18:229
- [3] Rogalski A, Ciupa R. Long-wavelength HgCdTe photodiodes: n-on-p versus p-on-n structures. *J. Appl. Phys.*, 1995, 77:3505
- [4] Capper P. *Properties of Narrow Gap Cadmium-based Compounds EMIS*. London: IEE Inspec., 1994,1