

同型外延材料表面光伏法测试的分析*

张秀森 贺国根

(杭州大学, 杭州 310028)

宋加涛

(宁波高等专科学校, 宁波 315010)

摘要 本文应用数值计算方法研究了表面光电压是表面非平衡少数浓度的单调函数这一假设对于同型外延材料的可应用性。我们发现这一假设对该材料一般地说并不成立。因此在使用等光伏表面光伏法测试同型外延材料少数扩散长度时一般不应把表面非平衡少数浓度视为常数。在文中,我们也分析了可以把表面非平衡少数浓度作常数处理的条件。

关键词 外延材料; 扩散长度; 表面光伏法。

1. 引言

表面光伏法是测量半导体材料少数扩散长度的常用方法。自六十年代初 A. M. Goodman^[1] 提出其基本理论后, 不少学者^[2-4] 对理论本身和测试方法不断加以研究。其应用范围也日益扩大, 如1972年 W. E. Phillips^[5] 的工作便是将其测试范围由单晶材料进一步扩展至诸如 P/P^+ 或 N/N^+ 的同型外延材料。目前, Phillips 的这项工作已被美国材料测试学会标准手册作为将表面光伏法用于同型外延材料测试时加以引用的唯一参考文献^[6]。

如图1所示, 对于 N/N^+ 材料, 当平行非贯穿光照射到样品表面时, 在样品表面附近激发的非平衡载流子将被表面电场分离。由于该材料除了在晶片表面存在表面电场外, 还在外延结处存在高低结电场, 样品内非平衡载流子将在高低结电场作用下发生分离, 从而建立光电压。所以从样品外面测得的总光电压 TPV 应为真正的表面光电

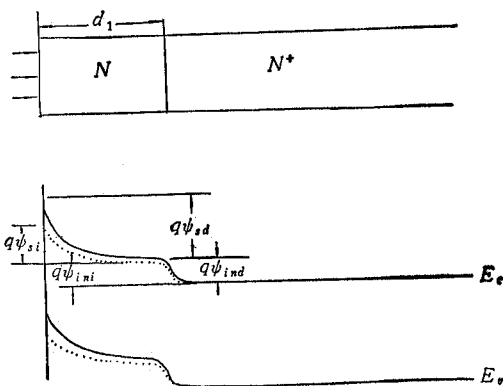


图1. N/N^+ 外延材料能带图

1991.07.23 收到, 1992.03.30 定稿.

* 高纯硅及硅烷国家实验室资助课题

张秀森 男, 1938 年出生, 副教授, 从事半导体器件与半导体物理的研究工作。

贺国根 男, 1946 年出生, 讲师, 从事微电子技术工作。

宋加涛 男, 1966 年出生, 硕士, 从事计算机软件开发研究工作。

压 SPV 和 高低结光电压 JPV 之和,即

$$TPV = SPV + JPV \quad (1)$$

我们知道,表面光伏法赖以成立的前提条件是根据 E.O. Johnson^[7] 和 T.S. Moss^[8] 研究所得的结论:从样品外面测得的表面光电压是表面非平衡载流子浓度的单调函数。这一结论对于仅存在表面电场的单晶材料显然是成立的,但对于同型外延材料,由于还存在高低结电场,其成立与否,就有待做进一步的研究。从目前作者所收集到的资料来看,这方面的工作并未见任何报道。而在 Phillips 的工作中仅仅是将此结论直接从单晶材料移用于外延材料,并未作任何分析和论述。

本文将对上述问题作详细的理论分析。

2. 分析方法

众所周知,半导体的表面光电压是无光照时的平衡表面势与光照下非平衡表面势之差。而表面势的高低,可以通过求解泊松方程和稳态多子和少子连续性方程求得。采用一维模型,在归一化条件下,这三个方程分别是^[9]

$$\phi'' = ue^\phi - ve^{-\phi} + N_A - N_D \quad (2)$$

$$(\mu_n u' e^\phi)' = U_b - G \quad (3)$$

$$(\mu_p v' e^{-\phi})' = U_b - G \quad (4)$$

式中

$$u = \exp(-\phi_n) \quad (5)$$

$$v = \exp(\phi_p) \quad (6)$$

$$G = \alpha I_0 \exp(-\alpha x) \quad (7)$$

$$U_b = (uv - 1) / [\tau_{p0}(ue^\phi + n_1) + \tau_{n0}(ve^{-\phi} + p_1)] \quad (8)$$

上述各方程中有关参数的意义和归一化因子见表 1。

表 1 参数及其归一化因子

参数名称	符 号	归一化因子
位置坐标	x	$L_D = [e_s kT / (q^2 n_i)]^{1/2}$
静电势	ϕ	kT/q
准费米势	ϕ_n, ϕ_p	kT/q
施主、受主浓度	N_D, N_A	n_i
扩散系数	D	$D_0 = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$
体复合率	U_b	$D_0 n_i / L_D^2$
产生率	G	$D_0 n_i / L_D^2$
光通量	I_0	$D_0 n_i / L_D$
载流子寿命	τ_{n0}, τ_{p0}	L_D^2 / D_0
载流子迁移率	μ_n, μ_p	$D_0 / (kT/q)$
吸收系数	α	L_D^{-1}
与 Shockley-Hall-Read 复合统计有关的参数	n_1, p_1	n_i

类似于 Seidman 和 Choo^[10] 的数值方法,我们建立了一套有效的计算机程序,用来数值求解上述方程组。

在以下的分析过程中,我们所取样品为 N/N^+ 硅外延材料,其能带结构如图 1 所示。我们取外延层厚度为 d_1 。假定样品未受光照时表面势垒区的初始表面势为 ϕ_{sd} , 高低结内建势为 ϕ_{ind} , 并且 d_1 足够大,以致于表面电场和内建电场相互独立。在光照下,样品表面势垒区的表面势变为 ϕ_{si} , 内建势变为 ϕ_{ini} , 根据前面所述各个光电势的定义,总光电压为

$$TPV = (\phi_{si} + \phi_{ini}) - (\phi_{sd} + \phi_{ind}) \quad (9)$$

表面势垒区的表面光电压为

$$SPV = \phi_{si} - \phi_{sd} \quad (10)$$

高低结光电压为

$$JPV = TPV - SPV \quad (11)$$

计算中有关参数的取值如表 2。由该表易求得平衡时 N/N^+ 结内建势为 $\phi_{ind} = 8.718 kT/q$ 。

3. 计算结果和讨论

表 2 计算中参数取值

	厚度 (μm)	电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	少子扩散 长度 (μm)	迁移率 ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)		施主浓度 (cm^{-3})	寿命 (μs)		与 Shockley-Hall-Read 复合统计有关参数 (cm^{-3})	
				μ_n	μ_p		τ_{n0}	τ_{p0}	n_1	p_1
N 区	10或30	5	25	1100	450	9×10^{14}	5.34	0.534	1.45×10^{10}	1.45×10^{10}
N ⁺ 区	250	0.0095	2.5	210	120	5.5×10^{17}	0.2	0.02	1.45×10^{10}	1.45×10^{10}

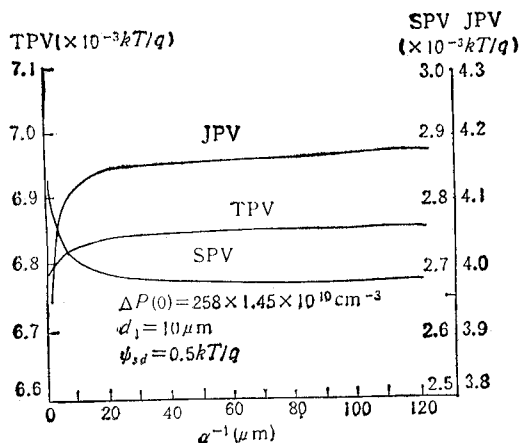


图 2 表面非平衡少子浓度一定时,三个光电压与透入深度 α^{-1} 的关系

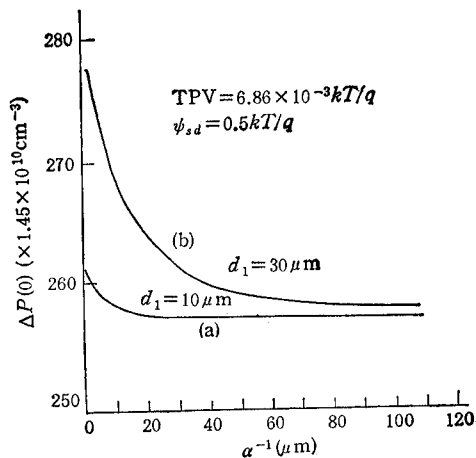


图 3 总光电压一定时,表面非平衡少子浓度与透入深度 α^{-1} 的关系

图 2 给出了外延层厚度 $d_1 = 10 \mu\text{m}$ 的样品当表面非平衡少子浓度一定时,三个光电压随入射光透入深度 α^{-1} 的变化关系。计算中表面势垒区的初始表面势 ϕ_{sd} 取 $0.5 kT/q$ 。由该图可见,当 α^{-1} 大于约 $20 \mu\text{m}$ 时,三个光电压基本上与吸收系数 α 无关;在 α^{-1} 小于 $20 \mu\text{m}$ 区域,它们则均强烈地依赖于 α 。图 3 中曲线 (a) 给出了同一样品当总

光电压 TPV 保持一定时(取 $TPV = 6.86 \times 10^{-3} kT/q$), 表面非平衡少数浓度随 α^{-1} 的变化。该曲线说明, 当测试条件满足等光伏法的要求时, 虽然在 α^{-1} 大于 $20 \mu\text{m}$ 的区域, 表面非平衡少数浓度基本上仍与吸收系数 α 无关, 但在 α^{-1} 小于 $20 \mu\text{m}$ 的区域, 表面非平衡少数浓度则随 α^{-1} 的减小而增大。

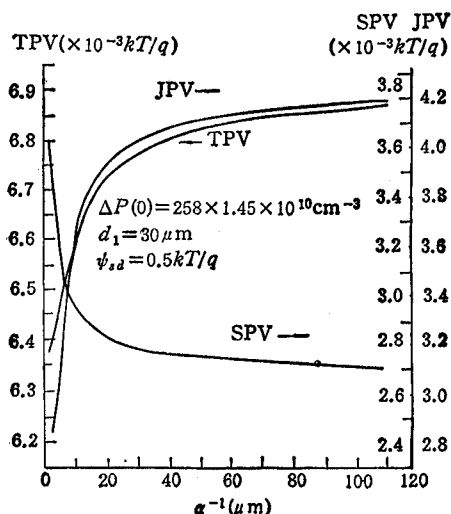


图 4 表面非平衡少数浓度一定时,三个光电压与透入深度 α^{-1} 的关系

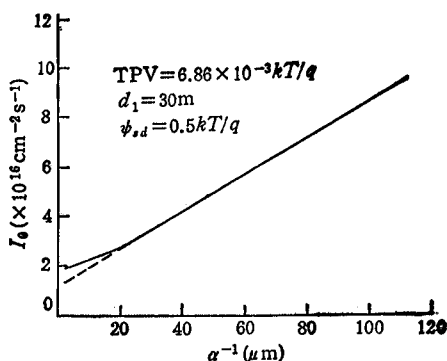


图 5 总光电压一定时,光强 I_0 与透入深度 α^{-1} 的关系
(注: 图中 30m 应为 $30 \mu\text{m}$)

图 4 和图 3 中曲线 (b) 分别给出了外延层厚度 $d_1 = 30 \mu\text{m}$ 的样品的计算结果。由图 4 可见, 当表面非平衡少数浓度一定时, 三个光电压对吸收系数 α 呈现出更加强烈的依赖关系。从物理上考虑, 高低结光电压 JPV 随透入深度 α^{-1} 减小而减小, 当然这是由于在高低结附近约一个扩散长度范围内的光生载流子产生率随透入深度 α^{-1} 的减小而减小。而表面势垒区的光电压 SPV 随透入深度 α^{-1} 的减小而增大, 则应归因于表面势垒区光生载流子产生率随透入深度 α^{-1} 的减小而增大。图 3 中曲线 (b) 则更清楚地说明, 对于该样品在等光伏条件下不能把表面非平衡少数浓度视为与吸收系数 α 有强烈的依赖性。在图 5 中我们直接给出了总光电压 TPV 一定时, 样品的 $I_0-\alpha^{-1}$ 函数关系。由图可见, $I_0-\alpha^{-1}$ 关系在 α^{-1} 小于外延层厚度 d_1 的区域明显偏离直线性。这正是表面非平衡少数浓度在这一区域对吸收系数 α 有强烈依赖关系的结果。

上述计算结果表明, 对于同型外延材料, 一般地说 Johnson 和 Moss 的结论不再成立。因此, 如果对于同型外延材料仍然简单地假设在等光伏条件下表面非平衡少数浓度与吸收系数无关^[2], 显然是不合理的。从图 2 和图 4 可以清楚地看出, 只有在 α^{-1} 大于外延层厚度 d_1 的区域, 表面非平衡载流子浓度 $\Delta P(0)$ 对吸收系数 α 的依赖关系才可忽略; 也只有在这个区域, 才能得到直线性较好的 $I_0-\alpha^{-1}$ 关系, 从而可使用等光伏表面光伏法同对型外延材料进行测试。

4. 结论

对于同型外延材料,由于高低结光电压的影响,在总光电压保持恒定的条件下,表面非平衡少数浓度在 $\alpha^{-1} < d_1$ 的区域对吸收系数有较强烈的依赖关系,因此对单晶材料适用的“表面光电压是表面非平衡少数浓度的单调函数”的结论对同型外延材料是不成立的。在实际使用等光伏表面光伏法测试同型外延材料的少数扩散长度时,应该取入射光透入深度 α^{-1} 大于外延层厚度 d_1 区域的数据,因为只有在该区域,表面非平衡少数浓度才可视为常数。

参 考 文 献

- [1] A. M. Goodman, *J. Appl. Phys.*, **32**(1961)12, 2550—2552.
- [2] S. C. Choo, A. C. Sanderson, *Solid-St. Electron.*, **13**(1970)5, 609—617.
- [3] S. S. Li, *Appl. Phys. Lett.*, **29**(1976)2, 126—127.
- [4] M. K. Alam, Y. T. Yeow, *Solid-St. Electron.*, **24**(1981)12, 1117—1119.
- [5] W. E. Phillips, *Solid-St. Electron.*, **15**(1972)10, 1097—1102.
- [6] Annual Book of ASTM Standards on Electronics, Part 43, F391, pp. 770—775, M. D. Easton (1978).
- [7] E. O. Johnson, *Phys. Rev.*, **111**(1958), 153—166.
- [8] T. S. Moss, *J. Electron. Cont.*, **1**(1955), 126—133.
- [9] M. K. Alam, Y. T. Yeow, *Appl. Phys. Lett.*, **37**(1980)5, 469—470.
- [10] T. I. Seidman, S. C. Choo, *Solid-St. Electron.*, **15**(1972)11, 1229—1235.

ANALYSIS OF THE SURFACE PHOTO-VOLTAGE METHOD MEASUREMENTS

Zhang Xiumiao He Guogen

(Hangzhou University, Hangzhou 310028)

Song Jiatao

(Ningbo College, Ningbo 315010)

Abstract The applicability of the assumption, “the surface photo-voltage is a monotonic function of the surface excess minority carrier density”, to epitaxial material is studied by numerical analysis method. It is found that this assumption is unreasonable for epitaxial material in general. Therefore when the minority carrier diffusion length in epitaxial material is measured by the equal-surface-photo-voltage method, the surface excess minority carrier density should not be considered as a constant. In this paper, the condition under which the surface excess minority carrier density may be treated as a constant is also analysed.

Key words Epitaxial material; Diffusion length; Surface photo-voltage