

硅耗尽表面准二维系统室温 电子隧道能谱

李志坚 周海平 马鑫荣

(清华大学微电子学研究所)

1984 年 10 月 24 日收到

用一种新的隧道注入机构,研究了半导体表面耗尽层准二维系统的电子能谱。对 Si(100) 表面,在室温下,确定出了多达 10 个以上的子带能量。给出了测量的理论分析和实验方法。实验结果表明,理论与实验符合得相当好。

一、引 言

硅表面反型层准二维系统电子子带结构的研究已经相当深入^[1]。研究的结果表明,除了电场的自洽计算外,还需计入复杂的电子-电子相互作用(交换和相关),以及其它一些效应,才能使理论与实验有较好的符合^[2]。

强电场作用下的耗尽表面是更为单纯的电子准二维系统。由于子带中没有电子占据,其本征能量可以在有效质量近似及三角形势阱近似下,严格地解出^[3]:

$$\left. \begin{aligned} E_{x,n} &= \frac{1}{(2m_{\perp})^{2/3}} (\hbar c \varepsilon)^{2/3} \gamma_n \\ \gamma_0 &= 2.338 \quad \gamma_1 = 4.087 \quad \gamma_2 = 5.520 \cdots \\ \text{对较大的 } n \quad \gamma_n &\simeq \left[\frac{3\pi}{2} \left(n + \frac{3}{4} \right) \right]^{2/3} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

因此,如果不是专门研究电子-电子相互作用等问题,在耗尽条件下进行子带能谱研究,可望达到理论与实验结果的更明确的一致。

此外,因为没有电子对外电场的屏蔽,在耗尽情况下实验可在更强的电场下进行。更有意义的是,由于没有电子散射的困扰,即使在较高温度下和对于较高的能量,子带间的界限也会很明确。这一点,再加上高电场下子带间距增大,可导致能在室温(而不象一般情况需在很低的温度)下测量子带能谱,并测得更多的子带信息。

迄今在文献上还没有见到过在耗尽条件下表面二维电子系统能谱实验测定的报道。本文设计了一个特殊的 MOS 结构,利用测定隧道注入电流得以在室温下检测出多达十个以上的 Si(100) 耗尽表面的子带能量,验证了公式(1)及准二维系统电子态密度的阶跃变化。本文第二节介绍实验原理和方法;第三节介绍实验结果;最后在第四节结论中对提出的研究方法作出简要的评论。

二、实验原理和方法

Tsui^[4] 等利用电子由金属栅通过薄栅绝缘膜向 MOSFET 沟道隧道注入电子的方法研究了一些半导体表面准二维系统的子带能谱。Quinn 等人^[5] 提出表面沟道隧道结 (SCTJ) 作为研究 MOS 表面子带的一种器件结构。但这二种方法都只适用于表面反型层的研究。有关 SCTJ 的设想还未见到有后续的具体工作的发表。本文采用的是类似于 SCTJ 的 MOS 结构, 称为表面隧道注入 MOS 场效应晶体管 (STIMOSFET) 结构。尽管管结构上都是 P^+PN^+ 型 MOS, 是相似的, 但工作原理与 Quinn 的 SCTJ 完全不同。如图 1 所示, P^+ 区表面在正栅压 V_g 作用下耗尽, 建立起垂直于表面的强电场, 导致电子由价带垂直表面隧道穿透到表面子带, 由于存在

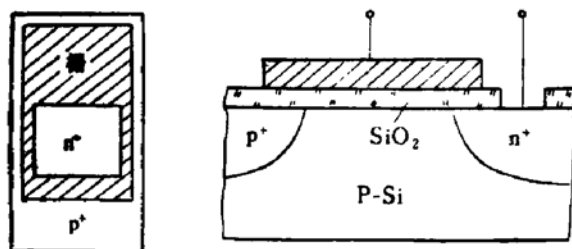


图 1 STIMOS 结构示意图

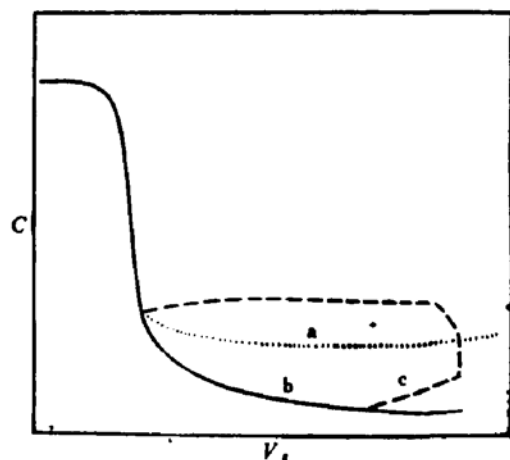
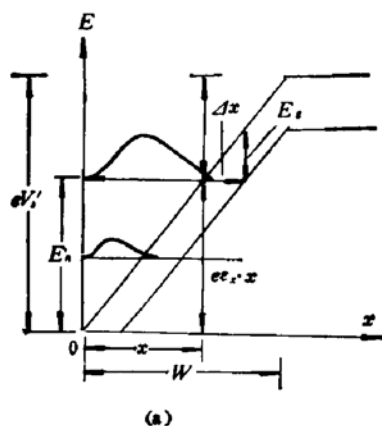


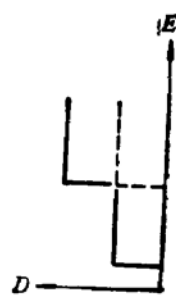
图 2 高频 $C(V)$ 特性

(a) 表面反型情况 (b) 表面耗尽情况
(c) 由于注入由耗尽转向反型

由 P 到 P^+ 的很强的横向电场, 隧道注入的电子被扫到栅下 P 区的耗尽层, 并进一步被 N^+ 极(加正压)抽出。抽取的情况用高频 $C(V)$ 特性监视, 如抽取不足, 注入的电子在 P 耗尽区表面累积, 逐渐形成反型层, 使 $C(V)$ 特性由耗尽型转而趋向正常的高频 $C(V)$, 发生转折点^[6], 如图 2 虚线所示。当 N^+ 加上较大的正电压时, 足以把注入的电子抽取净, 使 P 表面保持耗尽, $C(V)$ 继续保持耗尽型, 如图 2 实线所示。在达到后一情况下, 抽取电流将反映出隧道注入电流的状况。



(a)



(b)

图 3 (a) 电子由价带向表面注入模型 (b) 表面二维系统电子态密度分布

图 3(a) 为 P^+ 区隧道穿透的能带模型。 x 处的价带顶与表面子带能级 E_n 相平, 因此, 电子可以由价带隧道穿透到 E_n 。 设隧道长度为 Δx , 势垒高度为 ΔE , 则隧道穿透几率可写作:

$$T = T_0 \exp \left(-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m_{\perp}^* \Delta E} \cdot \Delta x \right). \quad (2)$$

其中 T_0 为常数, $m_{\perp}^*$ 为准二维电子垂直表面的有效质量 $m_{\perp}$ 与价带顶有效质量 m_v 的某种平均值。 由图 3(a) 可见,

$$\Delta E = eV_s' - E_n \approx e\epsilon_x(\omega - x) \quad (3)$$

(耗尽近似), 而

$$\Delta x = \frac{E_g}{e\epsilon_x} \quad (4)$$

$$\epsilon_x \approx \frac{eN_A'(\omega - x)}{\epsilon_s} \quad (5)$$

所以

$$T = T_0 \exp \left(-\frac{2E_g}{e\hbar} \sqrt{\frac{2m_{\perp}^* \epsilon_s}{N_A'}} \right) \quad (6)$$

N_A' 为 P^+ 掺杂浓度。

(6) 式说明, 虽然不同 x 处 ϵ_x 值不相等, ΔE 也不同, 但隧道几率只与 P^+ 区掺杂浓度 N_A' 有关, T 对于不同的 E_n 是相等的。 在第 n 子带内, 垂直表面方向的能量都是 E_n , 所以如果 $x = \omega$ 处的价带顶与第 n 子带中的 E 能态对准, 则能量在 E_n 到 E 间的子带各能态对隧道电流贡献为

$$I_N = TeA' \int_{E_n}^E f_v(1 - f_c) g_v D_n dE'. \quad (7)$$

这里 $f_v(E')$, $f_c(E')$ 分别为价带顶及子带能态 E' 的电子占据率, $f_v = 1$, $f_c = 0$; g_v 为价带顶的简并度, A' 为隧道区面积, D_n 为耗尽层中能量在 E_n 到 E_{n+1} 间的电子能态密度。 由此 (7) 式可简化为:

$$I_N = PT \int_{E_n}^E D_n dE' \quad (7')$$

P 为与 E 无关的常数。 隧道注入总电流为:

$$I_{in} = \sum_{E_0}^E I_N = PT \left[(E - E_n) D_n + \sum_{m=1}^n (E_m - E_{m-1}) D_{m-1} \right] \quad (8)$$

因为在准二维系统中的态密度为^[3]:

$$\left. \begin{aligned} D_0 &= g_s g_{cv} \frac{m_{\parallel}}{\pi \hbar^2} \\ D_1 &= 2D_0 \\ D_2 &= 3D_0 \\ &\vdots \\ D_n &= (n+1)D_0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 g_s 和 g_{cv} 分别为电子自旋和导带能谷简并度, $m_{\parallel}$ 为平行于表面的电子有效质量。

(9) 代入 (8) 得:

$$I_{in} = PTD_0 \left[(n+1)E - \sum_{m=0}^n E_m \right] = PTD_0 \left[(n+1)(eV'_i - E'_g) - \sum_{m=0}^n E_m \right]. \quad (10)$$

V'_i 为 P^+ 表面势, E'_g 为考虑了杂质带影响下的禁带宽度. 由 (10) 得:

$$G \equiv \frac{\partial I_{in}}{\partial V_g} = PTD_0 \left[(n+1)e \frac{\partial V'_i}{\partial V_g} - \sum_{m=0}^n \frac{\partial E_m}{\partial V_g} \right] \quad (11)$$

在耗尽条件下, 知

$$V_g = V_{ox} + V'_i = \frac{Q_{sc}}{C_{ox}} + V'_i = \frac{\sqrt{2\epsilon_s V'_i e N_A}}{C_{ox}} + V'_i. \quad (12)$$

所以

$$V'_i = V_g + \frac{\epsilon_s e N_A}{C_{ox}^2} \left[1 - \sqrt{1 + 2V_g / \left(\frac{\epsilon_s e N_A}{C_{ox}^2} \right)} \right] \quad (13)$$

$$\frac{\partial V'_i}{\partial V_g} = 1 - \left[1 + \frac{2V_g}{(\epsilon_s e N_A / C_{ox}^2)} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

在我们的实验条件下, $C_{ox} \approx 3.4 \times 10^{-8} \text{Fcm}^{-2}$, $V_g < 30 \text{V}$, $V'_i < 2 \text{V}$, 因而在小于 5—6% 的误差范围内,

$$\frac{\partial V'_i}{\partial V_g} \approx \frac{C_{ox}^2 V_g}{\epsilon_s e N_A} \quad (14)$$

另一方面, 可取垂直方向电场强度的平均值:

$$\begin{aligned} \bar{e} &\approx \frac{V_{ox} \epsilon_{ox}}{2t_{ox} \epsilon_s} = \frac{V_{ox} C_{ox}}{2\epsilon_s} \\ &= \frac{C_{ox}}{2\epsilon_s} (V_g - V'_i) \end{aligned} \quad (15)$$

代入 (1) 得:

$$\begin{aligned} E_n &\approx \frac{1}{(2m_{\perp})^{1/3}} \left(\frac{3}{4} \frac{\pi \hbar e C_{ox}}{\epsilon_s} \right)^{2/3} \\ &\times (V_g - V'_i)^{2/3} \left(n + \frac{3}{4} \right)^{2/3} \end{aligned} \quad (16)$$

所以

$$\frac{\partial E_n}{\partial V_g} \approx \frac{2}{3} \frac{E_n}{V_g - V'_i} \quad (17)$$

因为 $E_n < 1 \text{eV}$, 所以, 由 (14) (17) 分别代入后, (11) 式右边第二项与第一项相比可以被忽略, 从而得到

$$G \approx PTD_0 \frac{C_{ox}^2 V_g}{\epsilon_s N_A} (n+1) \quad (18)$$

(18) 式说明, 当 $x = w$ 处的价带顶越过某个子带底 E_n 时, 在相应的 V_g 下 G 将发生跳变. 由图 3(a) 可见, 发生跳变的条件为:

$$eV'_{in} - E'_g = E_n \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (19)$$

图 4 为预期的 $G(V_g)$ 关系. 并由 (18) 可知

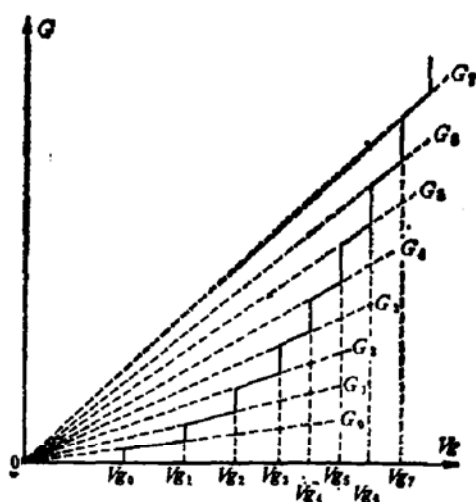


图 4 预期的 G 与 V_g 的关系

$$\frac{G_n}{G_{n-1}} = \frac{V_{g,n}}{V_{g,n-1}} \cdot \frac{n}{n-1} \quad (20)$$

实验的具体过程就是通过抽取电流 I_{N^+} 的测定(只要抽取完全,它反映 I_{in}), 决定出 $V_{g,n}$ ($n = 0, 1, 2 \dots$), 以此求出对应的 $V'_{n,n}$ 及 E_n , 并与 (16) 式的理论计算值进行比较. $I_{N^+} \sim V_g$ 测定的实验装置示于图 5(a); 图 5(b) 是 $C(V)$ 监视装置.

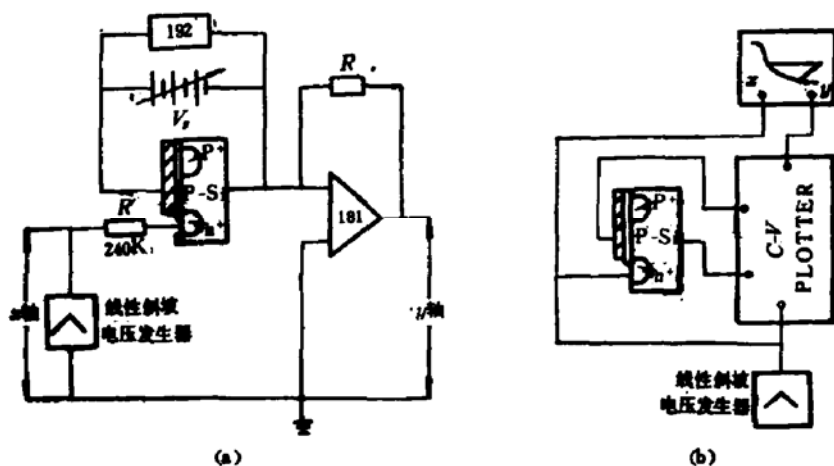


图 5 (a) 测试装置框图 (b) $C(V)$ 监视框图

三、结果与讨论

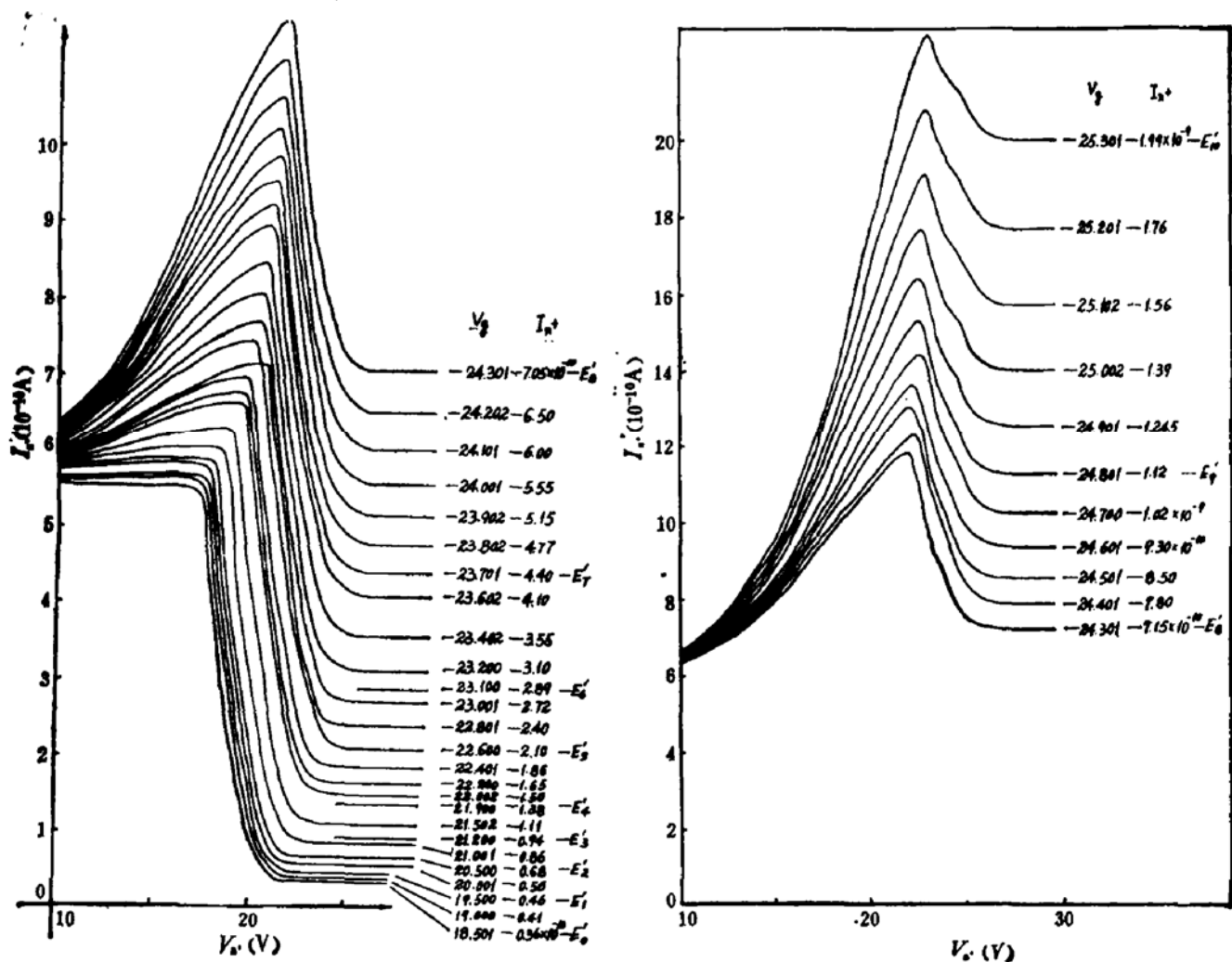
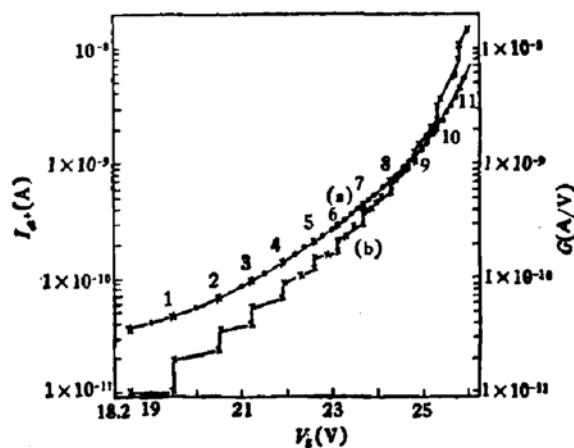
图 6 是以 V_g 为参数的实测 $I_{n^+} \sim V_{n^+}$ 的典型曲线族. 饱和前的电流变化显示了电子的抽取过程, 饱和值则反映隧道注入电流 I_{in} . 由图可以看到, 在某些 V_g 值下饱和电流的跨导 G_n 确实有跳变. 图 7 和图 8 为两个典型试样的 $G(V_g)$ 的测试结果.

应该指出, 图中不同的 $V_{g,n}$ 下硅表面的电场强度是不相等的. 实际上测定的是公式 (19) 所规定的 $eV'_n - E'_n$ 和公式 (16) 所规定的 $E_n(V_g)$ 两条曲线的交点(见图 9).

把实测的各 $V_{g,n}$ 值代入 (13) 式, 求出 $V'_{n,n}$, 再代入 (19) 式求出 E_n , 我们称之为实验值; 而把 $V_{g,n}$ 及相应的 $V'_{n,n}$ 值代入 (16) 式, 求得的 E_n 我们称为计算值, 两个样品的两种数值结果分别列于表 1 及表 2 中. 在计算 V'_n 时需用 C_{ox} 及 N'_A , C_{ox} 由实测决定, N'_A 则是通过拟合一个 E_n 值确定的, 即令 $n=n^*$ 并 (16) 式等于 (19) 式, 从而求出 V_{g,n^*} 和 V'_{n^*} 的关系, 代回 (19) 式, 以求出 N'_A . 对于其它 $E_1, E_2, \dots$ 则固定此 N'_A , 不再变化. 此外, 所用的 V_g 值还要经过平带电压修正, 后者也是直接测定的. 修正后的 V_g 在表中写作 V'_g .

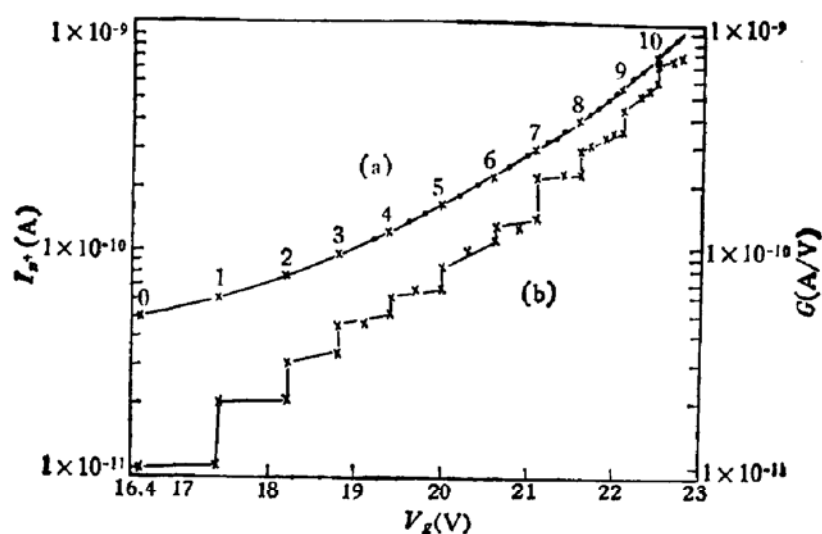
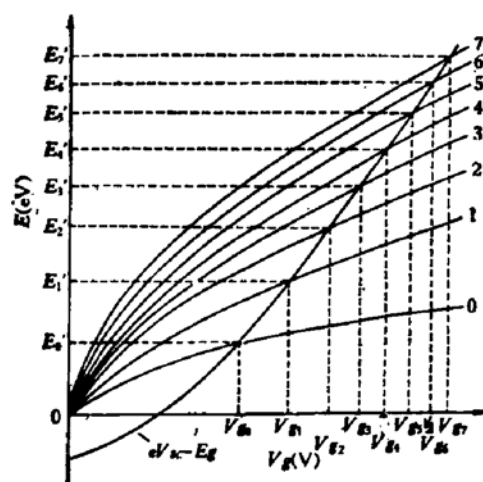
硅 (100) 表面有 $m'_\perp = m_\perp = 0.19m_0$ 和 $m_\parallel = m_l = 0.98m_0$ 两类能谷的子带. 对 $m'_\perp$ 能谷(其子带为 $E'_0, E'_1, \dots$) $m'_\parallel = \sqrt{m_l m_\perp}$; 对 $m_\perp$ 能谷, (其子带为 $E_0, E_1, \dots$) $m_\parallel = m_l$, $m'_\parallel > m_\parallel$, 且对于 E'_n 子带简并度 $g'_{cv} = 4$ 而对 E_n 子带 $g_{cv} = 2$, 所以子带态密度 $D'_n > D_n$. 更重要的是, 由于 $m'_\perp \ll m_\perp$, 公式 (2) 所决定的隧穿几率 T 对于 E'_n 子带要远大于相应的 E_n 子带. 这些都说明, 对应于 E_n 子带的隧穿电流将被 E'_n 子带隧穿电流所

* n' 为一任意特定值, 例如对 #2 样品取 $n' = 2$, #5 则取 $n' = 4$, n' 取不同值时对结果无明显影响.

图 6 实测的 $I_s \sim V_s$ 曲线, 以 V_g 为参变量图 7 实测的 $I_s \sim V_g$ (a) 及 $G \sim V_g$ (b), 样品 # 2

淹没。也就是说, 本方法测得的实际上是对应于 $m'_\perp = 0.19m_0$ 能谷的子带能谱 $E'_0, E'_1, \dots$ 。

表 1 和表 2 中 E'_n 的实验值和理论值之间的相对误差一般均小于 5%。表中还列出了对相邻子带能级间的能量差 ($E'_n - E'_{n-1}$), 以及用 $\epsilon^{\frac{1}{2}}$ 规律推算到统一电场强度 1×10^5

图 8 实测的 $I_s \sim V_g$ (a) 及 $G \sim V_g$ (b), 样品 #5图 9 分析得到的 $E_n(V_g)$ 及 $(eV'_n - E'_n) \sim V_g$ 的示意;说明测得的是交点对应的 E_n 及 $V_{g,n}$,
($n = 0, 1, 2, \dots$)表 1 样品 #2 $C_{ox} = 3.52 \times 10^{-4} \text{ F/cm}$ $V_{FB} = -2.4 \text{ V}$ $N_A = 1.18 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ $E_g = 1.075 \text{ eV}$

n	$V_g(\text{V})$	$V'_g(\text{V})$	$eV'_g(\text{eV})$	$E'_n = eV'_g - E'_g(\text{eV})$	$E'_n(\text{计算})$	$E'_n - E'_{n-1}(\text{eV})$ (计算)	$\bar{e}(\text{V/cm} \times 10^5)$	$E'_n(\bar{e} = 10^5 \text{ V/cm})(\text{eV})$	$E'_n - E'_{n-1}(\bar{e} = 10^5 \text{ V/cm})(\text{eV})$
0	18.501	20.9	1.22	0.145	0.140		3.33	0.063	
1	19.500	21.9	1.33	0.256	0.252	0.114	3.48	0.111	0.048
2	20.500	22.9	1.447	0.372	0.353	0.099	3.63	0.150	0.039
3	21.200	23.6	1.532	0.457	0.443	0.090	3.73	0.184	0.034
4	21.900	24.3	1.618	0.543	0.527	0.084	3.83	0.215	0.031
5	22.600	25.0	1.706	0.631	0.610	0.083	3.94	0.245	0.029
6	23.100	25.5	1.771	0.696	0.687	0.077	4.01	0.272	0.027
7	23.701	26.1	1.849	0.774	0.764	0.077	4.10	0.298	0.026
8	24.301	26.7	1.930	0.855	0.840	0.076	4.19	0.323	0.025
9	24.801	27.2	1.997	0.922	0.914	0.074	4.25	0.348	0.024
10	25.301	27.7	2.066	0.996	0.986	0.072	4.32	0.371	0.023
11	25.801	28.2	2.136	1.061	1.058	0.072	4.41	0.393	0.022

表2 样品#5 $C_{ox} = 4.1 \times 10^{-8} \text{F/cm}$ $V_{FB} = -2.0 \text{V}$ $N_A' = 1.22 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ $E_g = 1.075 \text{eV}$

n	$V_g(\text{V})$	$V_g'(\text{V})$	$eV_g'(\text{eV})$	$E_n' = eV_g' - E_g'$ (meV)	E_n' (meV) (计算)	$E_n' - E_{n-1}'$ (meV) (计算)	$\bar{e}(\text{V/cm})$	E_n' (meV) ($\bar{e} = 10^7$ V/cm)	$E_n' - E_{n-1}'$ (meV) ($\bar{e} = 10^7$ V/cm)
0	16.500	18.500	1.232	157	145		3.403×10^7	64	
1	17.400	19.400	1.347	272	262	117	3.558	112	48
2	18.200	20.200	1.452	377	363	101	3.695	152	40
3	18.800	20.800	1.534	459	454	91	3.797	187	35
4	19.401	21.401	1.617	542	542	88	3.899	219	32
5	20.000	22.000	1.702	627	626	84	4.001	248	29
6	20.602	22.602	1.790	715	708	82	4.102	276	28
7	21.100	23.100	1.864	789	787	79	4.186	303	27
8	21.602	23.602	1.939	864	864	77	4.270	328	25
9	22.102	24.102	2.015	941	940	76	4.353	352	25
10	22.501	26.502	2.078	1.003	1.015	75	4.420	377	24

表3 G_n/G_{n-1} 的测定与理论比较

样 品	实 验 值				理 论 值
	#2	#5	#4	#7	
G_1/G_0	2.00	2.00	1.80	2.16	2.10
G_2/G_1	1.50	1.50	1.45	1.25	1.56
G_3/G_2	1.42	1.36	1.38	1.50	1.37
G_4/G_3	1.33	1.20	1.32	1.29	1.29
G_5/G_4	1.25	1.31	1.26	1.19	1.23
G_6/G_5	1.24	1.18	1.60	1.21	1.20
G_7/G_6	1.23	1.57	1.86	1.16	1.17
G_8/G_7	1.18	1.29	1.30	1.19	1.16
G_9/G_8	1.25	1.25	1.41	1.11	1.13
G_{10}/G_9	1.35	1.22		1.29	1.12

V/cm 下的 $E_0', E_1', \dots$ 的数值。将表1中样品#2的 $1 \times 10^7 \text{V/cm}$ 下子带能谱与表2样品#5的相应数值作比较, 可发现其相符是很好的。表3列出了 G_n/G_{n-1} 的实验数值与(20)式的计算数值的比较, 结果也基本符合。因为(20)式推导比较粗略, 且在我们现行的结构下面积 A' 在不同 V_g 下可以不同, 所以对 G_n/G_{n-1} 的实验与理论比较不能有太高的要求。

从理论上估算, 如果 V_g 测定精度 ΔV_g 在 0.1 V 以内, 那么 $\frac{\Delta E_n}{E_n}$ 应小于 0.5%。实际误差较大的原因可能是出于电场强度公式(15)过于粗糙, N_A' 及 V_{FB} 等测定值不够准确。对于出入较大的点, 还很可能与高场下 SiO_2 的稳定性有关。这些都将在今后的工作中作进一步的考虑。

但是, 无论如何, 所取得的结果已足以说明, 本方法是行之有效的, 我们的分析基本正确。

四、小 结

设计了一种专门结构 STIMOS FET, 在室温下测定了硅(100)耗尽表面的隧道电子能谱, 得以确定出多达 10 个以上的表面准二维子带能量, 它们是对应于 $m_{\perp}^* = 0.19m_0$ 能谷的。实验所得的能级 E_n^* 数值与三角形势阱及有效质量近似下理论算得的数值符合较好, 从而证明了公式(1), 并验证了二维系统中电子态密度的公式(9)。

本方法获得的隧道谱有以下优点: ① 测定电场范围较大, ② 可得到较多的高子带信息, ③ 可在室温下进行测定。初步的实验还表明, 有可能用此方法测到相应于高能谷(即非(100)轴上)的隧道谱。

本实验方法有希望用于研究如应力、温度、表面杂质等物理因素对子带结构的影响; 而所提出的 STIMOSFET 器件有希望成为一种有效的集成器件。

本工作得到江丕桓、虞丽生两位同志的有益讨论, 特表示感谢。

参 考 文 献

- [1] F. Stern, *Surface Sci.*, **58**, 333(1976).
J. Koch, *Surface Sci.*, **58**, 104(1976).
Y. Uemure, *Surface Sci.*, **58**, 1(1976).
F. Stern, *Crit. Rev. Solid State Sci.*, **4**, 499(1974).
- [2] B. Vinter and F. Stern, *Surface Sci.*, **58**, 141(1976).
W. P. Chen, Y. J. Chen and E. Burstein, *Surface Sci.*, **58**, 263(1976).
T. Ando, *Surface Sci.*, **73**, 1(1978).
- [3] 御子柴宣夫著, 半导体物理, 第八章。
- [4] D. C. Tsui, *Surface Sci.*, **73**, 560(1978).
D. C. Tsui, G. Kaminsky and P. H. Schmidt, *Phys. Rev.*, **B9**, 3524(1974).
- [5] J. J. Quinn et al., *Surface Sci.*, **7**, 190(1978).
- [6] 马鑫荣、李志坚, 半导体学报, **5**, 440(1984).

Room Temperature Tunnel Electronic Energy Spectroscopy of Si(100) Depletion Surface Quasi-Two Dimensional System

Li Zhijian, Zhou Haiping and Ma Xinrong
(Institute of Microelectronics, Qinghua University)

Abstract

The electronic energy subbands spectroscopy of the semiconductor depletion layer quasi-two dimensional system is investigated by use of a new tunnel mechanism. More than ten subband levels are identified for Si(100) surface at room temperature. Theoretical analysis and methods of measurements are given. The results indicate that the experiment is quite reasonably consistent with theory.