

纳米硅结构中分裂能级对光电输运特性的影响*

陈 静^{1)†} 蒋震宗²⁾ 陆加佳²⁾ 刘永生¹⁾ 朱燕艳¹⁾

1) (上海电力学院直属数理系, 上海 200090)

2) (上海交通大学物理系, 上海 200240)

(2009 年 12 月 13 日收到; 2010 年 6 月 10 日收到修改稿)

基于电子在分裂能级系统中同时存在的共振隧穿和子带输运过程, 结合光生载流子作用提出了纳米硅结构中的光电输运理论模型. 利用该模型计算了纳米硅结构在光照条件下的电流密度、电场强度及电子浓度分布. 结果表明, 光生电子在具有分裂能级的纳米硅中是以共振隧穿为主要运输方式. 在此基础上, 详细研究了光电流与吸收系数、外加偏压以及纳米硅层层数之间的关系, 发现在特定的外界条件下光电流会出现跳变增加的现象, 其物理原因是纳米硅结构中电场强度的二次分布.

关键词: 光电流, 光电输运, 共振隧穿, 纳米点

PACC: 7230, 7360F, 7335C

1. 引 言

随着纳米点结构在第三代太阳能电池中的引入, 太阳能电池的光电转换效率有望得到进一步提高. 2006 年, Martí 等^[1]设计出具有 p-i-n 结构的太阳能电池, 并从实验上观察到了较高的量子效率, 其中 i 层主要由纳米点材料构成. 此后, 很多研究小组开展了纳米点结构太阳能电池的制备研究与开发^[2-6], 其中纳米硅材料以其独特的结构特性引起了人们的广泛兴趣. 这是一种由非晶硅边界和单晶硅微粒组成的混合材料, 单晶硅所占的晶态比可以在很大范围内调控^[7,8]. 与体材料硅相比, 纳米硅具有更强的光学吸收截面以及高载流子传导性, 其光学吸收和光电流效应都要比体材料硅强, 因而在太阳能电池等光电器件中有着很好的应用前景. 近年来, 人们在实验上开展了不同外场条件下纳米硅材料中载流子的电流-电压特性研究^[8-10], 并且在低温下观察到了负微分电导现象^[9], 从而分析得出纳米硅结构中分裂能级的存在以及量子隧穿效应在载流子输运过程中所起的作用.

与此同时, 有关纳米点光电输运方面的理论工作也逐步开展^[11-15], 这些理论模型包括泊松方程和

连续性方程、光子产生和复合作用、 $k \cdot p$ 哈密顿法等等. 但是, 上述理论模型都只考虑了单能级系统, 即假设纳米点中只存在一个电子能级, 电子是以子带输运的方式通过纳米点结构的, 整个模型中没有考虑共振隧穿作用. 事实上, 由于量子效应, 纳米点中往往存在着分裂的能级, 特别是在极低温情况下电子在分裂能级中的共振隧穿输运过程显得尤为重要. 可是到目前为止, 作者尚未见有关分裂能级系统下纳米点结构中光电输运的详细报道.

本文对纳米硅结构中分裂能级系统下光电输运过程进行了深入的研究, 所建立的理论模型同时考虑了共振隧穿、子带输运及光生载流子的作用. 通过数值计算, 分析了光照条件下纳米硅结构中电流密度、电场强度及电子浓度的分布, 讨论了吸收系数对光电流增益的影响以及外加偏压和纳米硅层总层数对光电流的作用, 从而为纳米硅在光电器件中的应用提供了理论依据.

2. 理论模型

我们考虑理想情况下的纳米硅结构, 单晶硅纳米点在结构中是均匀有序排列的, 四周由非晶硅包围, 如图 1(a) 所示. 在纳米硅两端施加偏压 U , 结构

* 上海市教育委员会“晨光”计划 (批准号: 2008CG60)、国家自然科学基金 (批准号: 10804072) 和上海市纳米技术专项基金 (批准号: 0852nm02400) 资助的课题.

† E-mail: jingchen@shiep.edu.cn

内部具有较高的电场强度,由于场致局域化效应,三维纳米点量子限制可以近似为沿着电场方向的一维纳米层量子限制^[16].因此,纳米硅结构的电子能带可以看作由 N 个单晶硅势阱和非晶硅势垒构成,其中 N 为沿着电场方向纳米硅层的总层数,势阱和势垒宽度分别为 W 和 B ,势垒高度 V_0 取决于单晶硅和非晶硅能带的不连续性,如图 1(b) 所示.

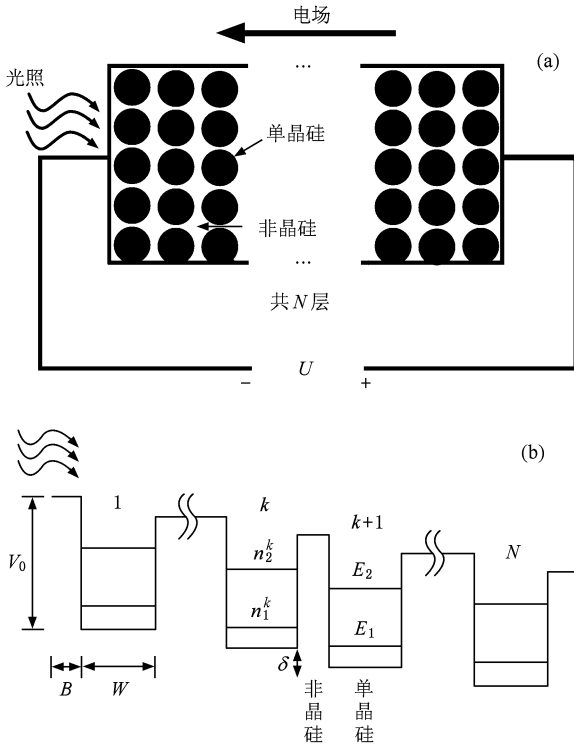


图 1 纳米硅结构及其在外加偏压下的能带示意图 (a) 纳米硅结构, (b) 外加偏压下纳米硅的能带示意图

在每层纳米硅中,我们考虑有两个分裂量子能级 E_1 和 E_2 , 令第 k 层纳米硅中两个能级上的电子浓度分别为 n_1^k 和 n_2^k , 达到稳定状态时它们将不随时间改变. 但当外界条件发生变化时, n_1^k 和 n_2^k 则要相应地进行调整, 直到建立起新的动态平衡. 以第 k 层纳米硅中 E_1 能级上的电子浓度 n_1^k 为例(图 2(a) 所示), 它可以通过八种途径发生改变. 途径 I 为带内弛豫过程, 即第 k 层中电子从 E_2 能级跃迁到 E_1 能级; 途径 II 为子带运输过程, 电子从第 $k-1$ 层中的 E_1 能级输运至第 k 层中的 E_1 能级; 途径 III 为子带运输过程, 电子从第 k 层中的 E_1 能级输运至第 $k+1$ 层中的 E_1 能级; 途径 IV 和途径 V 为共振隧穿过程, 分别对应着电子在第 $k-1$ 层中的 E_2 能级和第 k 层中的 E_1 能级之间的隧穿; 途径 VI 和途径 VII 为共振隧穿过程, 对应着电子在第 k 层中的 E_1 能级和第

$k+1$ 层中的 E_2 能级之间的隧穿; 途径 VIII 为光生过程, 指产生的光生电子跃迁到第 k 层中的 E_1 能级.

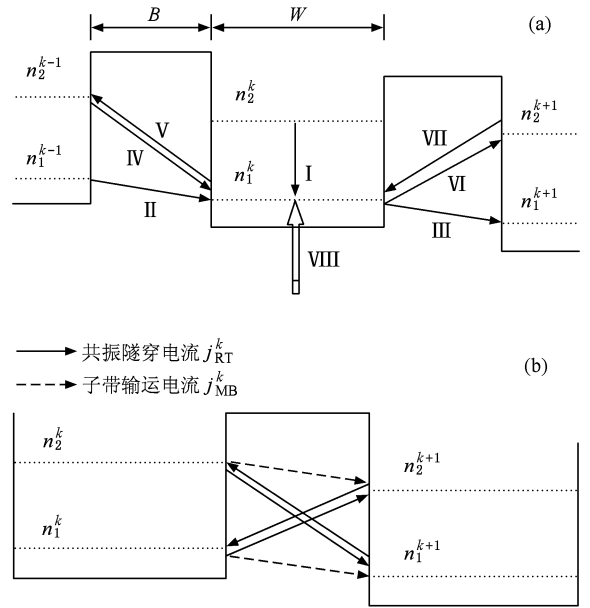


图 2 第 k 层纳米硅中 E_1 能级上的电子浓度 n_1^k 变化的八种途径及共振隧穿电流和子带运输电流示意图 (a) 电子浓度 n_1^k 变化的八种途径, (b) 流过第 k 层的共振隧穿电流和子带运输电流示意图

第 k 层中的电子从 E_2 能级弛豫到 E_1 能级的速率表达式为^[17]

$$A^k = \xi [\exp(n_2^k/n_c) - 1] \frac{n_2^k - n_1^k}{\exp(n_2^k/n_c) - \exp(n_1^k/n_c)} \quad (1)$$

这里我们假设电子满足准 Fermi-Dirac 分布, ξ 是带间散射的跃迁系数, $n_c = m_1^* k_B T_L / (\pi \hbar^2 W)$ 是纳米势阱中的电子气筒并浓度, 其中 m_1^* 为单晶硅电子有效质量, k_B 为玻尔兹曼常数, T_L 为晶格温度.

第 k 层中 E_i 能级上的电子输运至第 $k+1$ 层中对应的 E_i 能级 ($i = 1, 2$) 的速率表达式为

$$R_i(F^k) = \frac{2\lambda_i (W+B)}{\hbar W} \frac{I_1(2\lambda_i / (k_B T_L))}{I_0(2\lambda_i / (k_B T_L))} \times \sqrt{\frac{\tau_m}{\tau_c}} \frac{F^k / F_c}{1 + (F^k / F_c)^2} \quad (2)$$

这里 λ_i 为相邻势阱中波函数的重叠积分因子, τ_m 和 τ_c 分别为动量和动能弛豫时间, F^k 为加在第 k 个纳米层上的电场强度, $F_c = \frac{\hbar}{q(W+B)} \frac{1}{\sqrt{\tau_m \tau_c}}$ 为漂移速率达到最大值时所对应的临界电场强度(其中 q 为电子电量), $I_1(x)$ 和 $I_0(x)$ 为贝塞尔函数(低温

时 I_1/I_0 趋于 1).

我们使用文献[18]所介绍的微扰理论来求解共振隧穿过程中的隧穿概率,得到第 k 层中 E_1 能级上的电子向第 $k+1$ 层中 E_2 能级隧穿的概率为

$$P_{1 \rightarrow 2'} = \frac{[S(b_- + b_+) + 2b_- b_+]^2 \Delta E}{(b_- - b_+)^2 \pi \hbar}, \quad (3)$$

而第 $k+1$ 层中 E_2 能级上的电子向第 k 层中 E_1 能级隧穿的概率为

$$P_{1 \leftarrow 2'} = \frac{[S(b_- + b_+) + 2] \Delta E}{(b_- - b_+)^2 \pi \hbar}. \quad (4)$$

这里 S , b_+ , b_- 和 ΔE 都是理论模型建立过程中的一些中间量,它们的物理意义和详细的推导过程可参见文献[18].

将施加在纳米层上的电势差 δ 取负值,同样可以推出电子在第 k 层中 E_2 能级和第 $k+1$ 层中 E_1 能级之间的隧穿概率 $P_{2 \rightarrow 1'}$ 和 $P_{2 \leftarrow 1'}$. 另外,需注意到所有的隧穿概率都是电场强度 F^k 的函数.

波长为 λ 的光垂直入射到纳米硅结构,忽略反射,在距入射表面为 z 处的电子-空穴产生率为

$$G(\lambda, z) = \alpha(\lambda) F_0(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)z), \quad (5)$$

其中 $\alpha(\lambda)$ 为纳米硅对入射光的吸收系数, $F_0(\lambda)$ 为单位时间入射到单位面积结构上的光子数. 在 100 mW/cm^2 光照条件下, $F_0(\lambda)$ 的表达式可写为^[19]

$$F_0(\lambda) = 1.3029\lambda^{-4} \left[\exp\left(\frac{hc}{5760k_B\lambda}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (6)$$

模型计算时,我们假设所有吸收的光子都能产生电子-空穴对,并且光生电子全部都激发到 E_1 能级,此外,在强电场的作用下不考虑载流子的复合作用.

综合以上给出的每个途径的速率表达式,我们得到第 k 个纳米层中电子浓度 n_1^k 和 n_2^k 总的变化速率为

$$\begin{aligned} \dot{n}_1^k = & A^k + n_1^{k-1} R_1(F^k) + n_2^{k-1} P_{2 \rightarrow 1'}(-F^k) \\ & + n_2^{k+1} P_{1 \leftarrow 2'}(F^{k+1}) - n_1^k (P_{1 \rightarrow 2'}(F^{k+1}) \\ & + P_{2 \leftarrow 1'}(-F^k) + R_1(F^{k+1})) \\ & + G(\lambda, k(W+B)) \\ & (k = 1, \dots, N), \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} \dot{n}_2^k = & -A^k + n_2^{k-1} R_2(F^k) \\ & + n_1^{k-1} P_{1 \rightarrow 2'}(F^k) + n_1^{k+1} P_{2 \leftarrow 1'}(-F^{k+1}) \\ & - n_2^k (P_{2 \rightarrow 1'}(-F^{k+1}) + P_{1 \leftarrow 2'}(F^k) \\ & + R_2(F^{k+1})) \quad (k = 1, \dots, N). \end{aligned} \quad (7b)$$

通过调整纳米层中电场强度,使 n_1^k 和 n_2^k 不再随时间改变,从而得到最终动态平衡时纳米硅结构中的电场强度分布,并得到结构中第 k 层流向第 $k+1$ 层的总电流密度为

$$j_{\text{TT}}^k(F^k) = j_{\text{MB}}^k(F^k) + j_{\text{RT}}^k(F^k). \quad (8)$$

这里 $j_{\text{MB}}^k(F^k)$ 和 $j_{\text{RT}}^k(F^k)$ 分别为子带输运电流密度和共振隧穿电流密度,如图 2(b) 所示. 它们的表达式分别为

$$j_{\text{MB}}^k(F^k) = qW[n_1^k R_1(F^k) + n_2^k R_2(F^k)], \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} j_{\text{RT}}^k(F^k) = & qW[n_1^k P_{1 \rightarrow 2'}(F^{k+1}) \\ & + n_2^k P_{2 \rightarrow 1'}(-F^{k+1}) - n_1^{k+1} P_{2 \leftarrow 1'}(-F^{k+1}) \\ & - n_2^{k+1} P_{1 \leftarrow 2'}(F^{k+1})]. \end{aligned} \quad (9b)$$

3. 计算结果及分析

对上述理论模型进行数值计算,首先要确定模型中所用到的相关参量. 文献[8]报道的单晶硅纳米点的尺寸约为 5 nm , 并且每两个纳米点之间的间隔非常小,因此,在计算中我们取 $W = 5 \text{ nm}$, $B = 1.5 \text{ nm}$. 如图 1 所示,靠近光照一侧的纳米层称为第一层,电流收集侧的纳米层则为最后一层(即第 N 层),流出第 N 层的电流密度 j_{TT}^N 即为整个结构的光电流. 计算中所用到其他主要参量的取值列于表 1.

表 1 计算中用到的主要参量的取值

参 量	取 值
单晶硅势阱宽度 W/nm	5
非晶硅势垒宽度 B/nm	1.5
势垒高度 V_0/eV	0.6
单晶硅电子有效质量 m_1^*/kg	2.34×10^{-31}
非晶硅电子有效质量 m_2^*/kg	3.16×10^{-31}
纳米点中基态能级 E_1/eV	0.0423
第一激发态能级 E_2/eV	0.166
晶格温度 T_L/K	5
电子气筒并浓度 n_c/cm^{-3}	9.29×10^{16}

为了得到动态平衡时每个纳米层中的电子浓度 n_i^k 及电场强度分布,我们采用如下计算方法:对于给定的外加偏压 U ,先假定结构中的电场强度均为 $\frac{U}{N(W+B)}$, 求出初始的电子浓度,接着对公式(7a)和(7b)运用龙格-库塔方法来计算,通过改变场强分布,直到所有的浓度变化速率 \dot{n}_i^k 小于给定阈

值,表明动态平衡过程已经建立. 最终的电场强度、电流密度及电子浓度分布就可以得到.

我们首先计算无光照时暗电流、电场强度和电子浓度的分布,结果如图 3 所示. 模型中假设纳米硅的总层数 $N = 10$, 外加偏压 $U = 1$ V. 计算结果表明,整个纳米硅结构中的总电流密度 j_{TT}^k 是均匀分布的,即进入和穿出每个纳米层的电流密度相等. 在

图 3(a)中我们也相应地给出了共振隧穿电流 j_{RT}^k 和子带输运电流 j_{MB}^k , 显然在整个纳米硅结构中 j_{RT}^k 一直占主导地位. 因此,在考虑具有分裂能级系统的纳米硅结构时,我们不能忽略共振隧穿电流的贡献. 此外,在无光照时,电场强度及每个纳米硅层中两个能级上的平衡电子浓度 n_1^k 和 n_2^k 都是均匀分布的,如图 3(b)一(d)所示.

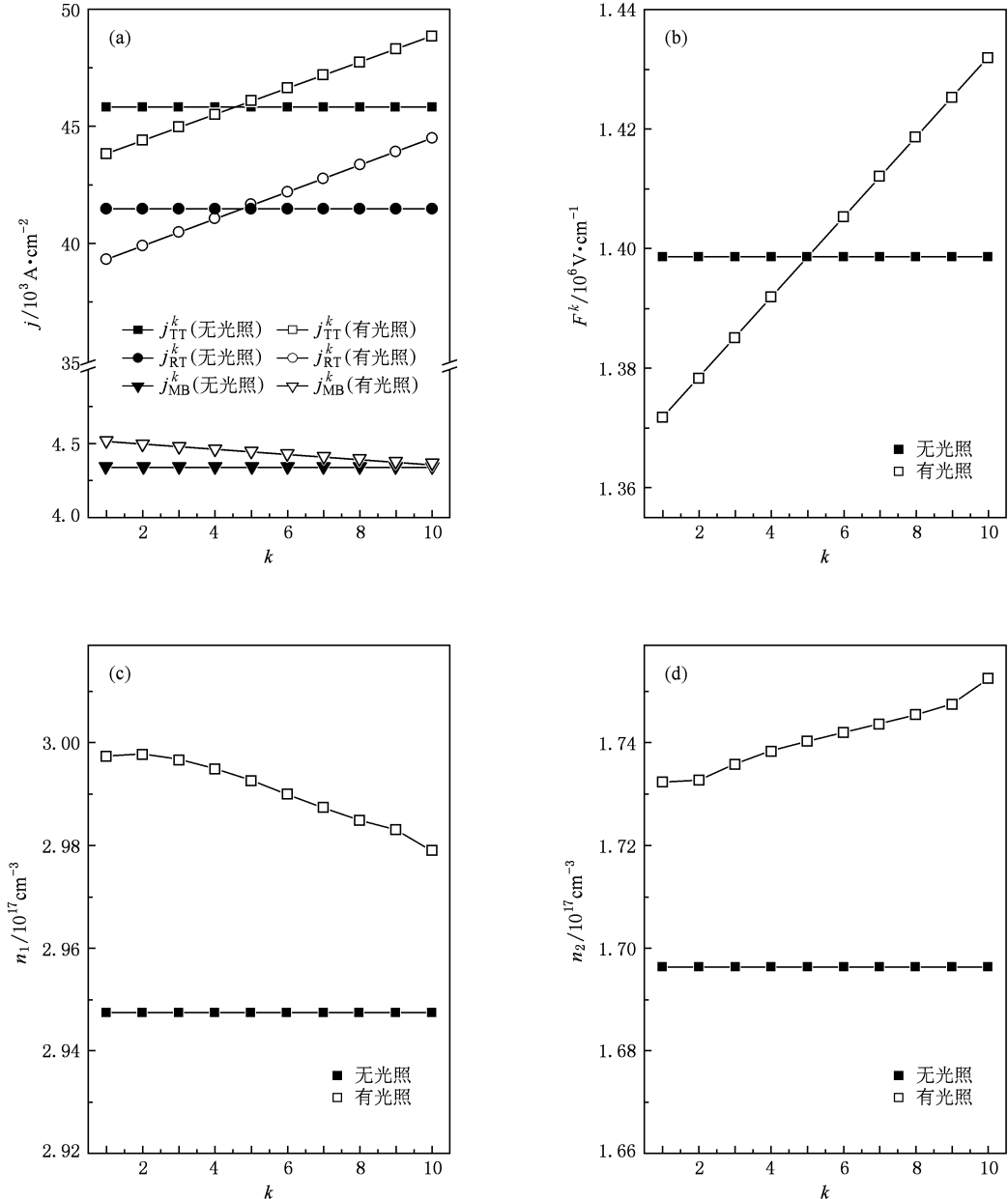


图 3 纳米硅结构在无光照 ($\alpha = 0$) 及有光照 ($\alpha = 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$) 情况下达到动态平衡时电流密度、电场强度以及电子浓度的分布 (a) 电流密度的分布, (b) 电场强度的分布, (c) 电子浓度 n_1 的分布, (d) 电子浓度 n_2 的分布

接着分析有光照的情况, 计算时入射光波长取 $\lambda = 550 \text{ nm}$ (可见绿光), 对应的吸收系数 $\alpha = 5 \times 10^3$

cm^{-1} , 图 3 同时也给出了计算得到有光照情况下动态平衡时光电流密度、电场强度和电子浓度在纳米

硅层中的分布. 从图 3 可以看出: 总电流密度 j_{TT}^k 在纳米硅结构中是不均匀的, j_{TT}^1 最小, 且小于无光照时的总电流密度. 随着纳米层层数 k 的逐渐增加, 最终得到的光电流密度 j_{TT}^{10} 与无光照时相比有明显增强. 从图 3 也可以看出, 电子在整个纳米硅结构中还是以共振隧穿电流为主导, 并随纳米层层数 k 的增加而渐渐增大, 但子带运输电流随着纳米层层数 k 的增加反而略有下降. 由此可知, 在纳米硅中产生的光生电子主要是通过共振隧穿方式参与运输.

纳米硅中光电流密度的分布可以根据场强和电子浓度的分布得到很好的解释. 图 3(b) 表明, 在有光照时, 纳米硅内部的电场强度分布 F^k 随着纳米层层数 k 的增加呈现增大的趋势. 由于加在整个结构上的总电势不变, 因而施加在前面几个纳米层上的电势要比无光照时小, 而加在最后一个纳米层上的电势会大于无光照时的情况. 又因为共振隧穿系数受势垒中的压降影响很大, 使得共振隧穿电流与无光照时相比有明显变化, 且通过最后一个纳米层的共振隧穿电流有显著增加.

有光照时, 纳米层中的平衡电子浓度也发生了变化, 每个纳米层中的 n_1 和 n_2 均大于无光照时的情况. n_1 在第一个纳米层中最大, 然后逐渐降低, 而 n_2 刚好相反, 随着纳米层层数 k 的增加而增大. 综合光电流密度、电场强度及电子浓度的分布, 可得到光照时电子输运过程如下: 光入射到纳米硅结构上, 在其内部产生了光生电子, 使每个纳米层中的电子浓度相应增加, 从而打破了无光照时所建立的动态平衡; 此时电场强度分布首先发生变化, 场强的改变影响了共振隧穿系数, 使共振隧穿电流发生变化, 进而改变了总电流密度; 另一方面, 电流的变化又会影响到纳米层中电子浓度的分布, 再次引起场强的调整; 以此类推, 直到最终建立起光照下新的动态平衡. 理论计算表明, 建立新动态平衡过程大约在 0.1 ns 内完成.

把流出结构的光电流密度与暗电流密度之比设为电流密度增益 η , 相应的 η_{TT} , η_{RT} 和 η_{MB} 分别为总电流密度增益、共振隧穿电流密度增益和子带运输电流密度增益. 一般情况下, 光电流密度的大小与光生电子的产生率有着密切的联系, 亦即和材料对光的吸收系数有关. 我们计算出不同吸收系数下的光电流密度, 并在图 4 中给出了 η_{TT} , η_{RT} , η_{MB} 与吸收系数 α 之间的关系. 从图 4 可以看出, 随着 α 的增加, η_{TT} 和 η_{RT} 都显著变大, 但是 $\eta_{\text{RT}} > \eta_{\text{TT}}$. 这主

要由于随着吸收系数 α 的增加共振隧穿电流明显增大, 但子带运输电流并没有明显变化, η_{MB} 保持在 1 附近还略有下降. 由于共振隧穿过程占主导, 使得总电流密度还是随着吸收系数的增大而变大. 从图 4 还发现, 当吸收系数增加到 $\alpha = 9 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 时, η_{TT} 从 2.1 跳变到了 2.9, 尔后再与 α 保持线性关系.

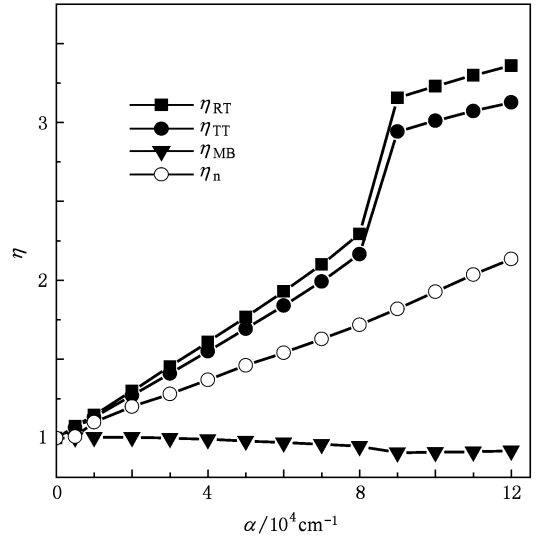


图 4 光电流密度增益 η 随吸收系数 α 的变化

为了研究上述光电流跳变的物理机制, 我们进一步分析了不同吸收系数下动态平衡时纳米层中的场强和电子浓度分布. 从图 5(a) 可以看出, 吸收系数 α 越大, 电场强度随纳米层变化的斜率也越大, 由于总电势恒定, 因此 F^1 随吸收系数的增大反而减小, F^{10} 则逐渐增大. 当吸收系数达到 $\alpha = 9 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 时, F^1 迅速减小并接近零, 此时吸收系数再增加对电场强度的分布几乎没有影响. 图 5(b) 给出了电子浓度 n_1 和 n_2 与吸收系数 α 的关系. 从图 5(b) 可以看出: 当光电流发生跳变时, 电子浓度的分布也出现了一个突变, 即当 $\alpha = 9 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 时 n_1^1 和 n_2^2 都迅速增大, 然后再随着纳米层逐渐减小; 而 n_1^{10} 和 n_2^{10} 随吸收系数的增大只是略有增加.

上述结果表明, 光电流跳变的本质来源于纳米硅内部电场强度的二次分布. 随着 α 的增大, 平衡时的 F^1 逐渐减小, 共振隧穿概率也在降低, 当 α 增大到一定程度时, 共振隧穿概率急剧下降, 导致共振隧穿电流迅速减小. 为了保持纳米层中电子浓度的动态平衡, 只有增大子带运输电流; 而子带运输系数随电场的变化不是很明显, 故只能通过增加电子

浓度来实现. 电子浓度的增加促成了电场强度的二次分布, 直到 F^1 接近零为止.

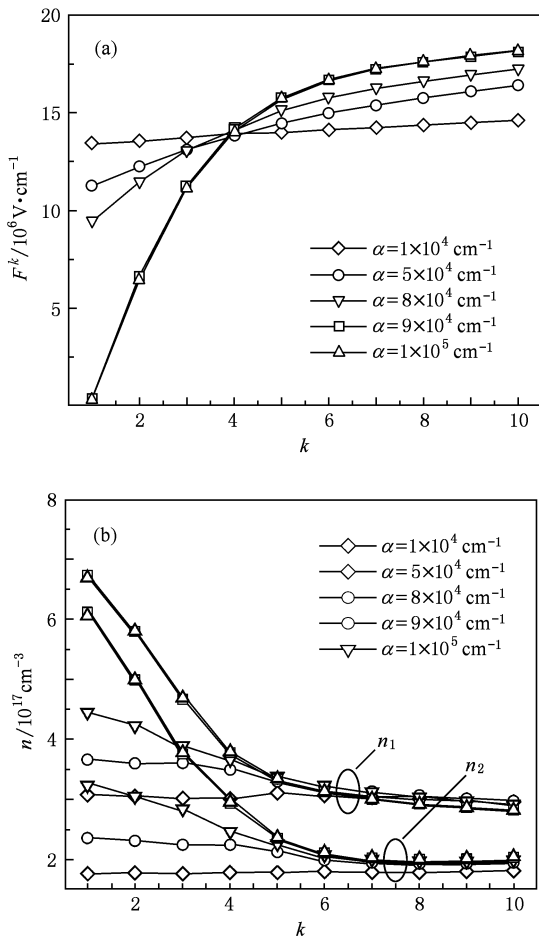


图5 不同吸收系数下电场强度及电子浓度在纳米硅层中的分布 (a) 电场强度的分布, (b) n_1 和 n_2 的分布

光电流发生跳变后, 由于 F^1 非常小, 在第一层中的电流将不再以共振隧穿为主导, 计算结果也表明, 此时 j_{RT}^1 和 j_{MB}^1 的大小相当. 但是沿纳米层方向 j_{RT} 增加迅速, j_{MB} 则逐渐减小, 因此最终流出的光电流还是以共振隧穿电流为主, 这也可以从图 4 反映出来. 文献[11—15]报道的研究纳米点结构的光电流理论模型一般只考虑单能级系统, 即光电流以子带输运电流为主. 由于没有共振隧穿电流的参与, 所得结果不会出现光电流跳变. 为了检验上述观点, 我们将模型中的共振隧穿概率都设为零, 即只考虑子带输运的贡献, 计算得到无共振隧穿时总光电流密度增益 η_n 随吸收系数 α 的变化关系如图 4 所示. 正如预期, 整个过程并没有出现光电流跳变现象.

由上述分析可知, F^1 降到某一临界值时才会发

生电场的二次分布, 而要达到该临界状态除了受到吸收系数 α 的影响外, 还可能与其他因素有关. 图 6 给出了外加偏压 U 和纳米硅层总层数 N 对光电流密度 j 的影响. 当 U 一定时, 随着 N 的增加, 光电流出现了先减小, 接着跳变增大, 再趋于稳定的过程. 如 $U = 1 \text{ V}$, 当 N 从 10 增加到 16 时, 光电流密度则从 $4.8 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 减小到 $3.0 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$. 这是因为在总电势不变的情况下, 如果纳米硅总层数 N 增加, 那么加在每一层上的电势减少, 使共振电流相应减小. 但当 N 增加到 17 层时, 我们观察到了光电流的跳变增大, 这个跳变正是由于 F^1 减小到了某一程度, 引起了场强的二次分布, 从而导致光电流发生了突变. 当 N 继续增加到 20 时, 光电流则趋于一个常值, 不再受纳米硅层总层数的影响.

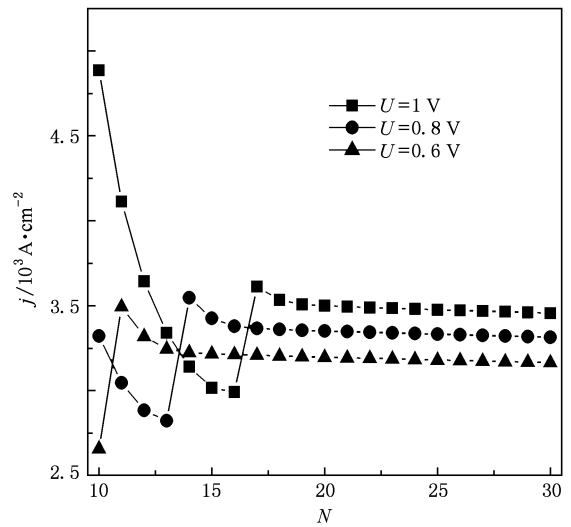


图6 不同外加偏压下光电流密度 j 随纳米层总层数 N 的变化关系

若降低外加偏压, 平均电场强度减小, 那么开始发生场强再分布所需的纳米硅层总层数相应减少. 这也可以从我们的计算结果中得到印证. 如图 6 所示: 若 $U = 0.8 \text{ V}$, 纳米硅总层数 N 从 13 增加到 14 时就会发生跳变; 若 $U = 0.6 \text{ V}$ 时, 则当 $N = 11$ 时就会发生跳变. 另外, 计算结果表明, 随着 N 的增加, 达到稳定时的光电流与外加偏压成正比, 且趋于稳定所需要的纳米硅层数也随着偏压的增加而增大. 目前, 新型 p-i-n 结构太阳电池的 i 层采用了纳米硅, 施加在纳米硅上的电压则为 p-n 结的内建电压, 而我们的理论研究表明, 可以根据需要生长合适的纳米硅总层数, 达到产生稳定光电流的目的. 此外, 从图 6 也可以看出, 若固定纳米硅总层数,

则随着外加偏压的减小,光电流也会出现跳变现象.如取纳米硅总层数 $N=12$,我们看到当 U 从 1 V 降到 0.8 V 时,电流密度在减小,但当 U 继续下降到 0.6 V 时,电流密度反而增加,说明此时纳米硅结构内部的电场也发生了二次分布,从而产生了光电流的跳变.

4. 结 论

本文建立了有光照时纳米硅分裂能级系统中

光电子输运的理论模型.研究表明:光照条件下共振隧穿电流在纳米硅结构中占主导地位,且光电流密度、电场强度和电子浓度在整个结构中都是非均匀分布的.光电流密度增益随着吸收系数的增加而变大,并且当吸收系数增大到一定程度时光电流出现跳变的现象.结合数值分析和理论研究得出,该跳变是纳米硅中电场强度发生二次分布所致.增加纳米硅总层数,光电流会出现先减小、接着跳变增加、再趋于稳定的变化过程.

-
- [1] Martí A, Antolm E, Stanley C R, Farmer C D, Lopez N, Diaz P, Canovas E, Linares P G, Luque A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 247701
- [2] Xu Y, Diao H W, Zhang S B, Li X D, Zeng X B, Wang W J, Liao X B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2915 (in Chinese) [许颖、刁宏伟、张世斌、励旭东、曾湘波、王文静、廖显伯 2007 物理学报 **56** 2915]
- [3] Hao X J, Cho E C, Flynn C, Shen Y S, Park S C, Conibeer G, Green M A 2009 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **93** 273
- [4] Shen Y, Bao J, Dai N 2009 *Appl. Surf. Sci.* **255** 3908
- [5] Wu Z M, Lei Q S, Geng X H, Zhao Y, Sun J, Xi J P 2006 *Chin. Phys. B* **15** 2713
- [6] Ma Z Y, Guo S H, Chen D Y, Wei D Y, Yao Y, Zhou J, Huang R, Li W, Xu J, Xu L, Huang X F, Chen K J, Feng D 2008 *Chin. Phys. B* **17** 303
- [7] Liu Y S, Chen K, Qiao F, Huang X F, Han P, Gao Q B, Ma Z Y, Li W, Xu J, Chen K J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5403 (in Chinese) [刘艳松、陈 铠、乔 峰、黄信凡、韩 培、高钱波、马忠元、李 伟、徐 骏、陈坤基 2006 物理学报 **55** 5403]
- [8] Chen X Y, Shen W Z 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 287
- [9] Chen J, Lu J J, Pan W, Zhang K, Chen X Y, Shen W Z 2007 *Nanotechnology* **18** 015203
- [10] Pan W, Lu J J, Chen J, Shen W Z 2006 *Phys. Rev. B* **74** 125308
- [11] Hu Z H, Liao X B, Zeng X B, Xu Y Y, Zhang S B, Diao H W, Kong G L 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 217 (in Chinese) [胡志华、廖显伯、曾湘波、徐艳月、张世斌、刁宏伟、孔光临 2003 物理学报 **52** 217]
- [12] Luque A, Martí A 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 5014
- [13] Wang J L, Wu E X 2007 *Chin. Phys. B* **16** 848
- [14] Aroutiounian V, Petrosyana S, Khachatryan A 2005 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **89** 165
- [15] Tomic S, Nicholas M, Timothy H, Jones S 2008 *Opt. Quantum Electron.* **40** 313
- [16] Ye Q Y, Tsu R, Nicollan E H 1991 *Phys. Rev. B* **44** 1806
- [17] Kunz R E, Scholl E 1993 *Phys. Rev. B* **47** 4337
- [18] Prengel F, Wacker A, Scholl E 1994 *Phys. Rev. B* **50** 1705
- [19] Gonzalez J C, Matinaga F M, Rodrigues W N, Moreira M V B, de Oliveira A G, da Silva M I N, Vilela J M C, Andrade M S, Ugarte D, Silva P C 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 3400

Effects of split-level energy on optoelectronic transport in nanocrystalline silicon *

Chen Jing^{1)†} Jiang Zhen-Zong²⁾ Lu Jia-Jia²⁾ Liu Yong-Sheng¹⁾ Zhu Yan-Yan¹⁾

1) (*Department of Physics and Mathematics, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China*)

2) (*Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*)

(Received 13 December 2009; revised manuscript received 10 June 2010)

Abstract

Considering the coexisting of electron resonant tunneling and miniband transport processes in a split-level energy system, and the effect of photogenerated carrier, we propose an optoelectronic transport theoretical model for the nanosilicon structure. We employ this model to calculate current density, electric field and electron density distribution under illumination, and the results show that resonant tunneling plays a major role in transporting the photogenerated electrons in a nanosilicon structure. Furthermore, we study the relationship between the photocurrent and the absorption coefficients, the applied bias, and the number of nanolayers. It is found that under certain conditions, hopping phenomenon occurs with photocurrent increasing, which is due to the redistribution of electric field inside the nanosilicon structure.

Keywords: photocurrent, optoelectronic transport, resonant tunneling, nanodot

PACC: 7230, 7360F, 7335C

* Project supported by the “Chenguang” Program of the Education Committee of Shanghai, China (Grant No. 2008CG60), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10804072) and the Nanotechnology Foundation of Shanghai, China (Grant No. 0852nm02400).

† E-mail: jingchen@shiep.edu.cn