

纳米结构器件材料结构参数的新测试方法^{*}

薛舫时

(半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083)
(南京电子器件研究所 南京 210016)

摘要 使用 Monte Carlo 模拟方法和器件振荡特性测试研究了异质谷间转移电子器件的直流隧穿特性和射频振荡性能与器件结构参数之间的关系。理论计算结果与实验数据间吻合得很好。在此基础上提出了通过电性能测试来分析器件结构参数的新方法。使用逐层化学腐蚀 C-V 测试测定了有源层的掺杂分布。通过低场电阻测量确定了量子阱的宽度。最后从器件振荡特性与 Monte Carlo 模拟曲线的对照中得出了掺杂接口的浓度。由此建立了器件结构参数的一套完整的测试分析方法。使用这套测试监控方法, 已成功地研制出 MBE 和 MOCVD 工艺的高效、大功率振荡器件。

关键词: 纳米结构, 结构参数, 测试方法, 理论计算

PACC: 6865; **EEACC:** 2560F

文章编号: 0253-4177(2000)02-0120-07

New Measuring Method for Material Parameters of Nanometer Structure Devices^{*}

XUE Fang-shi

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Beijing 100083, China)

(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Received 28 October 1998, revised manuscript received 15 March 1999

Abstract By using Monte Carlo simulation and oscillation performance measurement, the dependence of d. c. tunneling characteristics and oscillation performance of heterostructure intervalley transferred electron devices on structure parameters is investigated. The theoretical results agree with the experimental data very well. From this investigation we propose a new electrical measuring method to control the devices structure. The doping profile of active layer is measured by the C-V measurement. The quantum well width may be determined from the electric resistance measurement under low electric field. At last the dop-

* 国家自然科学基金资助课题(批准号: 69676022) [Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69676022].

薛舫时 男, 1939 年出生, 研究员, 从事半导体物理和器件研究。

1998-10-28 收到, 1999-03-15 定稿

ing concentration of the doping notch is inferred from the comparison between the oscillation performance and the Monte Carlo simulation curve. All of these measurements constitute a set of methods to control the devices structure parameters, by the help of which the high efficiency and high power oscillating devices have been fabricated.

Key Words: Nanometer Structure, Structure Parameters, Measuring Method, Theoretical Calculation

PACC: 6865; **EEACC:** 2560F

Article ID: 0253-4177(2000)02-0120-07

1 引言

自从 1970 年国际上发现量子阱隧穿共振负阻效应以来,运用这一隧穿共振负阻来产生微波振荡制成新的微波有源器件引起了大家的浓厚兴趣.然而这一器件的输出功率几十年来一直停留在几十微瓦的低水平上,没有实际使用价值.但是由此带动的半导体异质结、量子阱和超晶格物理研究却得到了迅猛的发展,并且这些新的物理概念立即被用于器件设计和制造中,出现了量子阱激光器、HEMT 和 HBT 等性能优越的新器件.我们在这一新领域的研究中发现,量子阱本身只有纳米量级的大小,难以由电子隧穿来直接产生大的射频功率.更何况纳米尺度的电极间距必将形成极大的极间电容,又为高频工作添置了新的障碍.一种有效的办法是象上述量子阱器件那样把量子阱的隧穿共振同其它器件的有源层结合起来,运用量子阱中电子的量子行为来控制其它器件有源层的工作,改善相应器件的工作性能,形成一种新的量子阱控制极.这样不但能够改善现有器件的性能,而且还可以使用这种新的不同于双极晶体管和场效应管的新控制极,来设计制造新的有源器件.

量子阱隧穿过程中的负阻仅产生在极窄的电压范围内,其电流变动的摆幅也比较小,控制功能就不很显著.为了增强量子阱的控制功能,我们研究了用直接带隙材料和间接带隙材料构成的新量子阱^[1].利用量子阱中的强能带混合使隧穿电子从电场中吸收能量后由一个能谷转移到另一能谷,即实现异质谷间转移电子效应.我们通过长期的理论研究发现了这一新的物理效应^[2],并且设计和制作适当的实验证实了该新效应^[3].利用这一效应可以通过量子阱上的电压来控制输出电子的种类,从而增强了量子阱的控制力度,构成一个有效的量子阱控制极^[4,5].

我们利用这种能带混合量子阱来控制耿氏器件有源层的工作,研究成一种新的异质谷间转移电子器件^[6].它由量子阱、掺杂接口和耿氏有源层三部分构成.其中量子阱和掺杂接口都只有纳米尺寸,它们与微米尺度的有源层结合起来构成一种具有纳米结构的新器件,我们称它为纳米结构器件.理论和实验研究表明^[6~8],由量子阱和掺杂接口构成的纳米结构对器件的性能起着至关重要的控制作用,于是提出了在工艺中精确控制这一纳米结构的新课题.

我们使用 MEB 和 MOCVD 工艺来生长这种纳米结构器件的材料.在器件的工艺研究中迫切要求寻找一种测量纳米结构参数的有效方法来监控器件制造.常规的隧穿共振二极管是由双垒单阱构成的,隧穿特性取决于量子阱的阱宽.利用量子阱的量子限制作用,阱宽可以由光跃迁的谱峰位置来测得.而现在的能带混合量子阱仅包含一层 AlAs 势垒,不能使用传统的光谱方法来测量势垒层的宽度.我们使用逐层腐蚀减薄 C-V 测试方法测量材料中的掺杂分布时,清晰地显示出有源层中的掺杂分布.但是这种测量没能达到纳米量级的精度,仍然不能给出纳米结构的信息.在我们的 Monte Carlo 器件模拟中^[7,8]发现,量子阱、掺杂接口和有源层三者对器件特性的影响是紧密地结合在一起的,难以直接通过器件模拟与特性测试的对照来确定它们.现在有源层的掺杂分布已由 C-V 测试中获得,重要的是把量子阱同掺杂接口两者分离开来.为此我们使用 Monte Carlo 模拟软件仔细地计算了不同偏压下有源层中的电场分布,发现随着偏压降低,有源层中的电场下降,并且向阴极端萎缩.在极低的偏压下电场在掺杂接口中的强空间电荷作用下迅

速下降为零,使外电压全部降落在量子阱上.这时器件的伏安特性就同单一的量子阱一样.利用隧穿电流与势垒宽度间的依赖关系,就可以从器件的低场电阻中直接测出量子阱的宽度.有了有源层和量子阱的结构参数,便能通过器件的动态模拟从微波特征测试中来确定出掺杂接口的结构.于是我们能从 C-V 特性、低场电阻和射频振荡特性的综合测试中方便地确定出器件的有源层、量子阱和掺杂接口的参数.

2 器件结构和 C-V 测试

异质谷间转移电子器件的设计宗旨是利用异质谷间转移电子效应和耿氏效应产生的负阻来产生射频振荡.这两种谷间转移电子效应将在器件动态工作过程中产生很强的相互作用,必须对它们进行全面综合的优化设计.耿氏效应依赖于电场强度,因此重要的是设计有源层中的电场分布,创造出一个适宜于改善射频振荡的电场环境.当能带混合量子阱中产生异质谷间转移电子效应时,其电场强度高达 10^6 V/cm ,而耿氏效应却在 10^3 至 10^4 V/cm 的电场范围内产生.于是必须设置一个极薄的电场过渡区使量子阱的电场同耿氏有源层电场匹配起来,达到最佳的工作状态.因此我们在量子阱与有源层之间设置了一个适当浓度的重掺杂层,形成一个掺杂接口.该掺杂接口的浓度及宽度取决于量子阱结构、量子阱上的电压及有源层的掺杂浓度,必须联立求解量子阱的电子隧穿方程、泊松方程及有源层中的漂移、散射方程来确定.我们已运用量子隧穿理论和 Monte Carlo 模拟方法编制了相应的设计软件,进行器件结构设计.图 1 中画出了所设计的器件结构图.

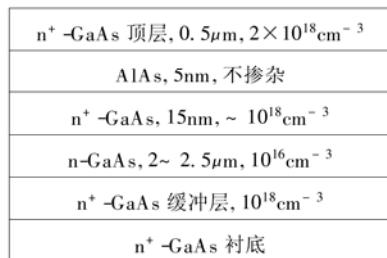


图 1 量子阱控制极耿氏器件结构图

FIG. 1 Structure of Gunn Device with Quantum Well Controller

精细地控制这些生长层及其掺杂浓度常常是十分困难的.最严重的问题是我们目前缺乏测试这种纳米材料的手段.如何设计有效的测试方法来精确地测定这三者的结构参数就成为器件工艺研究中的一个重要关键.

在通常的微波半导体器件研究中都是使用 C-V 方法来测定有源层中的掺杂分布的.对于比较厚的有源层来说,使用逐层化学腐蚀方法就可以测出整个层中的掺杂分布.我们用这种方法测试了由 MBE 工艺生长的纳米结构材料,图 2 中画出了所测得的掺杂分布曲线.从此分布来看,左端 $0.4 \mu\text{m}$ 是重掺杂层,掺杂浓度高达 $1.2 \times 10^{18} \sim 1.4 \times 10^{18} / \text{cm}^3$,它相当于图 1 中的 n+ -GaAs 帽层和重掺杂接口层.其右面就是有源层,由于材料生长过程中的杂质扩散效应,出现了一段掺杂浓度的过渡层,最后趋于 $1.5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 的有源层平坦掺杂分布.这一掺杂分布

首先在 n+ -GaAs 衬底上生长一层 n+ -GaAs 缓冲层,接着生长 n-GaAs 有源层 $2 \sim 2.5 \mu\text{m}$.有源层顶端生长一层 n+ -GaAs 掺杂接口,用来控制有源层中的电场分布.再在其上生长一薄层 AlAs,顶端盖以 $0.5 \mu\text{m}$ 的 n+ -GaAs 帽层,构成一个直接带隙/间接带隙异质结构.

量子阱是产生异质谷间转移电子效应的关键,而掺杂接口则决定了器件有源层中的电场分布,控制着器件工作时两种谷间转移电子效应间的相互作用,和器件的动态工作.因此器件工作中的一个重要关键是量子阱、掺杂接口与有源层之间的相互配合.而量子阱和掺杂接口都只有 10 nm 左右的宽度,要在 MBE 或 MOCVD 工艺中

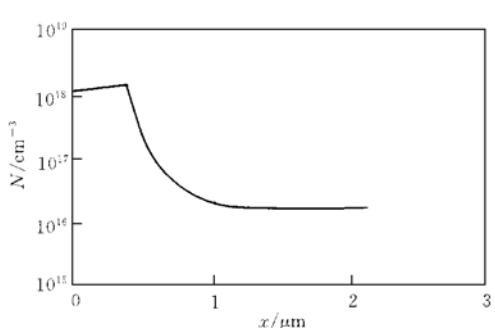


图 2 用逐层腐蚀 C-V 方法测出的器件掺杂分布图

FIG. 2 Doping Profile Determined by Progressively Etching C-V Measurement

曲线清晰地显示出有源层的掺杂结构,但是由于测量的精度远低于纳米尺度,相应的量子阱和掺杂接口都被淹没在左端的重掺杂层中,不能从 $C-V$ 测试中确定出它们的结构参数。

3 从器件的低场电阻中来测定量子阱的宽度

既然量子阱和掺杂接口是决定有源层工作的关键,我们就指望能从不同量子阱和掺杂接口下器件工作特性的研究中来确定它们的参数。为此我们把量子阱的能带混合隧穿共振理论同有源层中电子运动的 Monte Carlo 模拟方法结合起来编制出器件的 Monte Carlo 模拟软件。运用这一软件对不同结构器件在各种偏置条件下的直流和射频工作特性进行模拟计算。

我们从 $C-V$ 测试中得到启示,当我们改变偏压时空间电荷层的边界就随之移动,是否能改变偏压使电场仅仅局限于量子阱中,从而独立地测量出量子阱的结构呢?为此我们在不同的偏压下对器件中的电场分布进行了模拟计算。图 3 中的实线画出了在 4.76V 偏压下器件有源层中的电场分布。电场分布在很宽的范围内,其变化达 10^3 以上。因此只能画在对数图上。左边界的电场高达 10^6 V/cm ,在掺杂接口空间电荷的作用下,电场很快下降到 10^5 V/cm 左右。进入有源层后掺杂浓度降低,使电场下降速度变慢。随着电子浓度增大,补偿了施主杂质的空间电荷,出现了一段平坦的电场分布。由于 Γ 电子的漂移速度大于上能谷电子的速度,当它们一起向右漂移时, Γ 电子跑得比 X 和 L 电子快,在它们交界处的电子浓度就降低,形成一个强空间电荷区,使那里的电场快速下降,在 $0.6 \mu\text{m}$ 附近电场降低到 10^4 V/cm 范围。我们把该边界以左的区域称为强场区。而它的右端电场逐渐下降到 10^3 V/cm ,进入耿氏振荡的电场范围,形成一低场耿氏区。这一电场分布结构取决于器件上的降压、量子阱中的电场强度、掺杂接口的浓度和有源层中的电子浓度分布。由于量子阱、掺杂接口和有源层三部分中应保持连续的电流,电场结构就受制于量子阱的隧穿电流,即由异质谷间转移电子效应所决定。模拟中发现要使量子阱产生较强的异质谷间转移电子效应和隧穿电流,量子阱上必须加有 0.45V 以上的电压。该电压决定了量子阱中和掺杂接口层左边界的电场。如果量子阱的宽度增大,阱中的电场强度下降,左边界的电场降低,使电场分布曲线下移,相应的强场区宽度就变窄。当掺杂接口浓度降低时,掺杂接口层中的电场下降变缓,提高了掺杂接口与有源层交界处的场强,电场分布曲线上移,使强场区扩大。因此这两种因素交织在一起,难以分别测定两者的结构参数。

现在我们考虑偏压降低时电场分布的变化。图 3 中的虚线画出 2.56V 下的场强曲线。由于偏压下降,量子阱降压随之降低,左端电场很快在掺杂接口的空间电荷作用下降低到低场耿氏区,不形成显著的强场区。点划线所画的是 1.49V 偏压下的场分布。此时左边界电场进一步下降,使电场下降得更快,在 $\sim 0.3 \mu\text{m}$ 附近就下降到接近于零,低场耿氏区都随之消失。这样我们很容易想到,在很低的偏压下,量子阱边界的电场很低,在掺杂接口中强空间电荷的作用下很快就下降为零。使得电场都集中在量子阱中,伏安特性仅仅取决于量子阱的结构。这样就降低了量子阱同掺杂接口间的耦合,能方便地单独测出量子阱的结构参数。

图 4 中用实线、虚线和点划线分别画出了阱宽为 4nm、5nm 和 6nm 量子阱在超低电压下的伏安特性。隧穿电流随着阱宽增大而下降。从零点附近的曲线斜率中推算出对应的低场电阻分别为 0.48、1.22 和

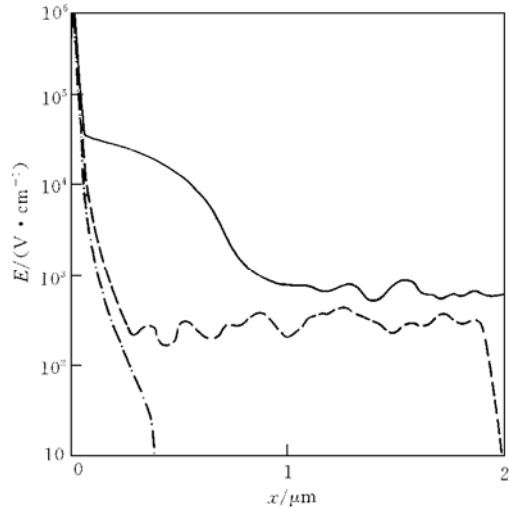


图 3 三种不同偏压下有源层中的电场分布

FIG. 3 Electric Filed in Active Layer
under Different Biases

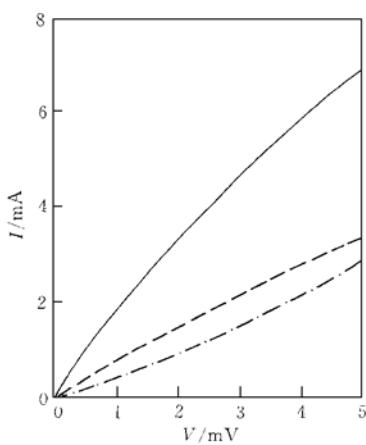


图 4 超低偏压下不同量子阱宽度器件的计算的伏安特性

FIG. 4 Calculated V - I Curves of Device with Different Quantum Well Widths at Ultralow Biases

2. 18Ω . 计算中使用的结面积为 10^{-4}cm^2 , 考虑到实际的器件结面积和串联电阻以后, 该电阻是同实测的器件低场电阻相吻合的. 我们在具体的工艺试验中把低场电阻的范围控制在 $3\sim 5\Omega$ 内. 如果电阻偏大, 说明量子阱的宽度太大, 就适当减薄量子阱厚度. 电阻偏小时就需加宽量子阱. 这样我们就能从简单的低场电阻测量中获得量子阱宽度的信息, 从而调整量子阱生长工艺, 把阱宽控制到设计的范围内.

4 掺杂接口浓度的测定

在确定了有源层的掺杂分布和量子阱的宽度以后, 器件的工作性能取决于掺杂接口的浓度. 于是掺杂接口的参数就可以从器件的工作特性中来推算. 图 5 中画出了用 Monte Carlo 模拟软件算出的不同掺杂接口浓度器件在 1V 射频电压摆动下的振荡转换效率. 实线、虚线、点划线和点线分别示出厚度为 15nm 掺杂接口浓度为 1.54×10^{18} 、 1.52×10^{18} 、 1.5×10^{18} 和 $1.48 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 的计算结果. 由于动态 Monte Carlo 模拟要对整个射频周期进行模拟, 而且还需经过十几次迭代才能达到收敛, 计算量很大. 我们对每条曲线仅选取了 5 点进行迭代计算. 所得的各

条曲线形状不很一致. 但从它们的变化趋势中容易看出随着掺杂接口浓度的下降, 振荡电压的范围增宽并向高压方向扩展. 这是因为掺杂接口浓度下降时, 强场区中的电场下降变慢, 强场区的宽度增大, 相应的器件振荡电压就升高, 其变化范围也增宽. 图 6 中用实线、虚线和点划线分别画出了三种不同掺杂接口浓度下器件的振荡输出功率. 实线对应于最高的掺杂接口浓度, 它在低压下就起振, 在 $4\sim 6\text{V}$ 偏压下振荡输出功率较大. 在 5V 左右给出 200mW 的最大输出功率, 当偏压高于 6.2V 以后器件就停振. 虚线画出中等掺杂接口浓度下的输出功率. 它的振荡电压范围很宽, 5V 起振, 在 $6\sim 8\text{V}$ 电压范围内都有较大的输出功率, 在 8V 偏压下输出 120mW . 这两条曲线的结果同图 5 所示的计算效率吻合得很好. 点划线示出掺杂接口浓度最低器件的振荡输出功率, 它在低偏压下不振荡, 直至偏压高于 7V 以后才起振, 在 8V 偏压下输出 160mW . 在更高的电压下器件因为输入直流功率过大而烧毁. 由于高输入功率下不太高的振荡效率就能给出较大的输出, 因此这一结果还是同图 5 结果相一致的. 从图 5 和图 6 的结果来看, 小小的掺杂接口就能显著地改变器件的射频工作特性, 使振荡电压能在很大的范围内调制. 由此便证明了量子阱控制极的重要控制功能. 通过这一理论模拟和实验研究我们就可以从器件射频振荡电压范围的测量中来推算相应的掺杂接口浓度. 我们所研制器件的振荡电压范围约在 $3\sim 6\text{V}$ 内, 如果振荡电压高于这一范围就可以适当增强掺杂接口浓度. 反之振荡电压偏低时, 就应该降低掺杂接口强度.

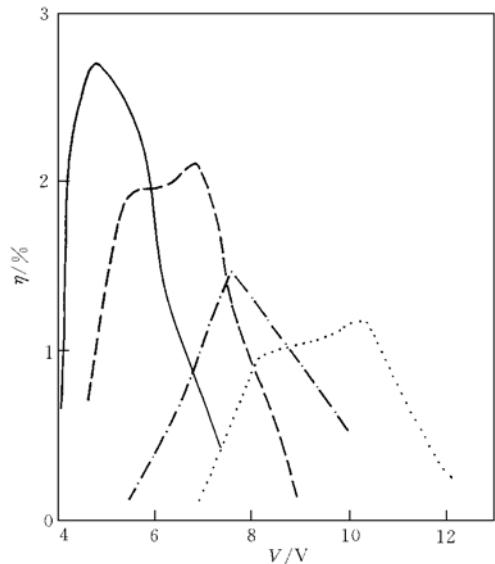


图 5 1V 射频电压摆动下不同掺杂接口浓度器件的计算振荡效率

FIG. 5 Calculated Oscillation Efficiency Versus Bias at Different Doping Notch

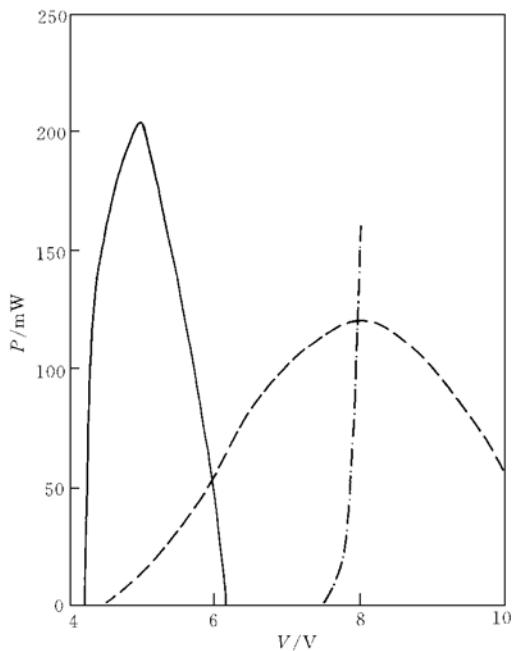


图 6 三种不同掺杂接口浓度下
器件振荡输出功率随偏压的变化关系
FIG. 6 Oscilation Power Output Versus
Bais at Different Doping Notch

5 讨论

我们在能带混合量子阱研究中发现了新的异质谷间转移电子效应,利用这一效应实现了量子阱的控制功能,设计并研制成新的量子阱控制极。图 5 和图 6 的结果就证明了量子阱控制极的重要控制功能。运用这种量子阱控制极有效地控制了耿氏有源层的工作,制成了高效大功率的异质谷间转移电子器件。这一器件的主要特征是把纳米结构的量子阱控制极同微米尺度的有源层结合起来,发展成新一代的量子阱控制器件。这种器件要求纳米结构和微米有源层之间配合得很好,从而在工艺研究中就必须寻找出能分别精确地测出这两种结构参数的有效方法来监控器件工艺制造。

使用逐层腐蚀 C-V 测试方法可以很方便地测定有源层的掺杂分布。纳米结构参数的测定就难以使用常规的测试方法。我们通过器件的 Monte Carlo 模拟发现,在不同的器件偏压下,量子阱、掺杂接口和有源层之间的相互关联有明显的变化,适当控制偏压可以减小两者间的关联,创造出独立测试量子阱结构的特殊环境。运用这种新的思路,我们从器件低场电阻的测定中获得了独立测量量子阱宽度的新方法。然后通过器件动态工作特性的模拟和实验结果的对比研究中又寻找到测定掺杂接口浓度的新方法。从而建立起一套监测纳米材料生长的有效方法。使用这一套方法来监控材料生长,我们用 MBE 和 MOCVD 工艺都制成了性能很好的器件。8mm 波段工作的器件最大脉冲输出功率达 2.55W,最高振荡效率超过 18%。

量子阱超晶格物理的研究为半导体器件研究开辟出许多新的途径。利用纳米结构来控制微米、亚微米材料的动态工作,也是一条探索新器件的有效途径。除了器件设计以外,寻求有效的工艺监控方法同样是非常重要的。我们在器件研究中常常发现要制成高性能的异质结器件常常比生长单一的高迁移率二维电子气材料更难。因为我们不仅要对器件的各类参数进行有效的优化设计,同时还必须寻找出监控这些参数

的有效方法,使这种优化结构能真正在工艺制造中实现。在这里我们发现通过对器件在不同环境下工作特性的模拟研究能从电参数测试中来求得重要的结构信息,建立起有效的工艺监控方法。

参 考 文 献

- [1] Xue F S, Semicon. Sci. Technol., 1989, **4**: 150.
- [2] 薛舫时, 物理学报, 1990, **39**(6) : 984[Xue Fangshi, Acta Physica Sinica, 1990, **39**(6) : 984(in Chinese)].
- [3] 薛舫时, 邓衍茂, 张崇仁, 固体电子学研究与发展, 1993, **13**: 1[Xue Fangshi *et al.*, Research & Progress of Solid State Electronics, 1993, **13**: 1 (in Chinese)].
- [4] 薛舫时, 半导体杂志, 1997, **22**(4) : 1[Xue Fangshi, Semiconductor Magazine, 1997, **22**(4) : 1 (in Chinese)].
- [5] Xue F S, Chinese Phys. Lett. (to be published)
- [6] Xue F S, Deng Y, Zhang C, Chinese J. Electronics, 1995, **4**: 15.
- [7] 薛舫时, 电子学报, 1998, **26**(8) : 51[Xue Fengshi, Acta Electronic Sinica, 1998, **26**(8) : 51 (in Chinese)].
- [8] 薛舫时, 半导体学报, 1998, **19**(1) : 1[Xue Fangshi, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(1) : 1 (in Chinese)].