

# 高纯 GaAs 中的等离子体振荡现象

郑一阳

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 报道了一种新的半导体体效应器件——体等离子体器件, 它是由很薄的高纯 GaAs 层构成(1—2 $\mu\text{m}$ ), 在强电场(大于 200kV/cm)下产生雪崩击穿, 形成一个由电子和空穴组成的等离子体, 这一等离子体有较宽的等离子体振荡频率, 并强烈地依赖于外磁场, 因此可以做成振荡器及磁敏传感器, 有广泛的用途.

**关键词:** 新的体效应器件; 体等离子体器件; 雪崩等离子体; 振荡源及磁敏器件

**PACC:** 5275

**中国分类号:** TN387

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2001)10-1329-06

因此它也属于体效应器件.

## 1 引言

固体中的等离子体共振是固体物理学中的一个基本现象和效应, 也是半导体物理学中的一个基本效应. 在七十年代, 人们试图用体半导体材料加高电场去获得一种新器件, 但由于使用的样品很长, 很难使体内达到均匀的浓度分布, 因此, 在高电压下只能形成对整体作用不明显的局部雪崩击穿. 另外由于半导体材料杂质较多, 深能级形成很多陷阱(电子陷阱或空穴陷阱), 因此在雪崩后不易形成电子空穴的等离子体, 而形成单种载流子, 其现象是在发生雪崩后, 即出现一个 S 型负阻<sup>[1,2]</sup>, 这样就得不到体等离子体器件, 因此该研究工作逐渐减少.

我们在实验中首次利用高纯薄层(1—2 $\mu\text{m}$ ) 砷化镓体内高电场下雪崩产生的等离子体效应, 做成体等离子体器件, 在高电场下使有源区内产生均匀的电子空穴等离子体. 它具有一般等离子体的特性, 受外磁场的影响, 而且能产生直至微波的发射频率, 因此将有广阔的应用前景.

本文描述了器件的制作方法, 从伏安特性的研究中发现了等离子体模式及 S 型负阻的非等离子体模式, 并研究了它的磁场作用及光辐射现象, 证实了等离子体的存在.

由于等离子体器件的结构与体效应器件相似,

## 2 实验与测试

我们用 GaAs 材料制作体等离子体器件时, 关键是要获得一层薄而均匀的高纯度层, 厚度是 1—2 $\mu\text{m}$ , 若雪崩离化的击穿电场是 200kV/cm, 则外加电压是 20—40V 左右.

在高纯度材料的薄层两边, 做两个欧姆接触. 由于高纯度材料直接与金属形成欧姆接触有困难, 通常做一个低阻抗高浓度的同质过渡层, 从而形成金属-n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup>-金属的对称结构. 制成的样品有很大的低场电阻, 在室温暗条件下测得的低场电阻为数百 k $\Omega$  到 100M $\Omega$  之间, 并有很强的光敏性. 当用白炽灯光照射时, 低场电阻明显下降, 这一类样品也存在光生伏特效应.

器件可以做成夹层型或平面型, 但结构都是一样的. 我们用离子探针和激光光电导进行测量并确定高阻区的存在, 但高阻区的存在并不能说明会获得等离子体器件. 在高阻区中会出现两种情况, 一种是高纯高阻区, 出现雪崩后能得到等离子体器件; 另一种具有深能级的高阻区, 由于陷阱的存在不易得到等离子体器件, 而得到 S 型的负阻器件.

测试电路如图 1 所示, 由于器件具有很高的阻抗并有光敏性, 因此要在暗条件下进行. 测试时可以

郑一阳 男, 1936 年出生, 研究员, 研究兴趣半导体体效应器件、Gunn 器件、Hall 器件及等离子器件.

2000-12-25 收到, 2001-04-13 定稿

加一个直流偏置, 为了防止雪崩后出现大电流烧毁器件, 需要加一个限流电阻  $R$ . 当电流很大时, 最好用脉冲偏置, 防止大电流时的焦尔热.

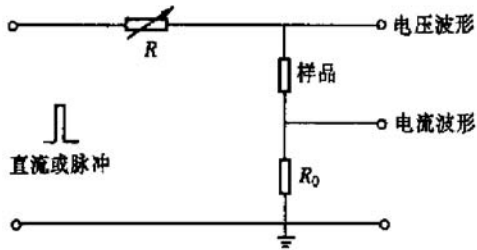


图 1 器件的测试电路

FIG. 1 Test Circuit of the Devices

测试中我们发现, 即使用同样的工艺条件制作器件的欧姆接触, 由于有源区的材料制作纯度不同, 在低场时性能相似, 但在加高电压到雪崩击穿以后, 有明显的差别, 可以分两类: 即体雪崩等离子体模式及体雪崩 S 型负阻器件. 前者是本文报道的内容, 后者是另一种模式.

### 3 结果及讨论

#### 3.1 伏安特性研究

对器件最基本的研究是观察它的伏安特性曲线, 在图示仪上我们可以观察到两种明显不同的伏安特性曲线. 当外加电压升高时, 出现一个小电流的线性区, 随着电压逐渐增加, 开始出现非线性区, 但仍是一个高压小电流区, 这时器件体内电场已经很高, 以致达到足以产生载流子碰撞离化的程度. 当电压再加高一点, 体内电场达到  $200\text{kV/cm}$  的雪崩击穿电场, 就有大量电子空穴出现, 形成一个等离子体, 此后出现了两种不同的情况.

##### 3.1.1 体等离子体模式的伏安特性

图 2 曲线  $a$  是用点测得到的伏安特性曲线. 为了防止电路阻抗淹没负阻, 把取电流的电阻去掉, 让器件直接接地, 而在器件的电源端接一电流表测电流. 当高阻层内的电场达到雪崩击穿电场之后, 开始出现雪崩击穿. 由于产生的电子空穴对的空间电荷的影响, 高阻层内的电场分布会使两边的电场强而中间的电场弱, 这样维持高阻层内继续产生雪崩的高阻层两端电压降可能会下降一些. 而器件有一定

的内阻, 所以要使高阻层内继续维持雪崩击穿, 器件两端的电压不但不能下降, 反而要随雪崩电流增加而上升一些, 否则如果器件两端电压大幅度下降, 雪崩现象就要停止发生.

从图 2 曲线  $a$  中可看到, 从  $7\text{V}$  开始就有雪崩出现, 这时显示出一个从噪声到不相干不稳定性的过程. 随着电流增加, 电压也一直增加, 直到  $9\text{V}$ . 当电流为  $140\mu\text{A}$  时, 出现  $2\text{ms/周}$  的相干波形, 此后再增加电流, 电压略有降低, 这由于出现了相干波形. 电压是由恒定的直流电压叠加一个振荡波形, 振荡部份的交流平均值用直流电压表测量时略低于相干波形出现前的电压, 当电流再增加, 电压值又回到原来的值, 而且略有增加.

图 2 照片  $c$  是用图示仪测得的这类器件的伏安特性曲线, 虽有振荡出现, 但没有明显负阻, 与点测的结果是相符的.

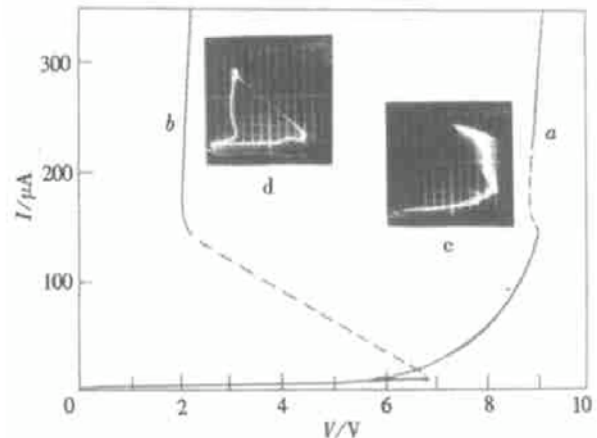


图 2 点测与图示仪测得的伏安特性曲线

FIG. 2  $I-V$  Curve Obtained from Spot Measurement and Graphical Meter

##### 3.1.2 非等离子体模式的 S 型伏安特性曲线

图 2 曲线  $b$  所示的伏安特性曲线特点是在达到雪崩击穿电压以后, 从高压、小电流状态进入到低电压、大电流的状态, 形成一个 S 形负阻, 其原因主要是由于体内的空穴陷阱所形成的. 当外加电压使有源区产生雪崩击穿以后, 形成了大量的电子空穴对. 由于材料在制作过程中有很多深能级, 形成大量的空穴陷阱, 空穴很快被陷阱所陷, 破坏了原来的电子-空穴对的电中性状态, 多余的电子立即参与导电, 使有源区的电子浓度增加很多, 大大提高了电导能力, 使器件的体电阻减小, 允许大电流通过, 这样便形成了一个低压大电流的状态, 在这种情况下, 通

常需要一个限流电阻来限止它的功耗, 否则容易造成器件的损坏.

在实验中观察到, 对于这一类器件, 起振条件与限流电阻有关, 即与工作点有关, 文献[3]中说明实验与理论分析符合得很好.

### 3.2 电流振荡机理

由于器件两种不同的工作机理, 产生的振荡也是不同的. 对于体等离子体的模式, 这种振荡是由于雪崩后体内电子与空穴的等离子体产生的, 由于  $noL \ll 10^{12} \text{cm}^{-2}$ , 因此排除了 Gunn 振荡的可能性.

在我们研究的器件中, 高场下, 当电场达到  $200 \text{kV/cm}$  以上时, 有源区内就产生雪崩离化、雪崩离化过程中产生大量的电子空穴对, 形成一个等离子体. 电子和空穴维持电中性的趋势是非常强烈的, 但是在固体中, 不像气体中那样均匀. 半导体中晶格本身的不均匀性及在加工器件的过程中引入的不完整性, 会使半导体内局部区域有电子过剩, 这些过剩只是浓度起伏的一个扰动. 此外, 这些过剩电子还产生一个电场, 迫使电子向外扩散和运动, 于是过剩很快就会消失. 由于电子运动速度很快, 使电子不能在恢复到电中性时立刻停下来, 往往会过一点, 结果出去电子过多, 于是电子的不足代替了原来电子的过剩, 这时出现一个反向电场又把这些电子拉回来, 又出现了过剩的现象. 这一过程重复出现时, 就形成了等离子体内部电子的集体振荡, 于是在外电路中可以观察到振荡波形. 在振荡频率较低时, 波形大部份都是非正弦的, 在高频时, 接近正弦波. 在等离子体振荡中, 最引人注意的是振荡频率及其对外界物理量的依赖关系, 我们在后面将对其进行讨论, 这是传感器的基础. 现在我们讨论振荡频率, 设电子的质量为  $m_e$ , 在没有外磁场时的电子运动方程是:

$$m_e \frac{d^2x}{dt^2} = - e4\pi n e x$$

上式是一个振荡方程, 振荡角频率是:

$$\omega_{pe} = \left[ \frac{4\pi n e^2}{m^* \epsilon \epsilon_0} \right]^{1/2}$$

式中  $\omega_{pe}$  是等离子体的振荡角频率, 单位为  $\text{rad/s}$ ;  $n$  是电子密度, 以  $\text{m}^{-3}$  计;  $e$  是电子电荷, 单位为  $\text{C}$ ;  $m^*$  是有效质量, 单位为  $\text{kg}$ ;  $\epsilon \epsilon_0$  是固体的电容率, 单位为  $\text{F/m}$ . 对于载流子浓度为  $10^{20}/\text{m}^3$ , 有效质量为  $0.01m_e$ , 介电常数为 14 的半导体来说, 等离子体频率可达  $10^{11} \text{Hz}$ .

$$f_{pe} = \omega_{pe}/2\pi \approx 10^4 n^{1/2} \text{Hz}$$

即电子空穴浓度达到  $10^{14}/\text{cm}^3$  时, 振荡频率可以进入微波频段.

等离子体振荡频率依赖于器件中的电子-空穴浓度, 并有平方根的关系, 这是等离子体工作模式的一个特点, 因此可以作为一个判据. 但实际测试中要确定等离子体浓度  $n$  是很困难的, 因此实验中往往通过  $I = ne\mu E$  这一公式来粗略确定. 其中  $I$  是通过器件的工作电流;  $n$  是载流子浓度, 也就是电子空穴对的浓度, 即等离子体浓度;  $e$  是电子电荷;  $\mu$  是迁移率. 要考虑到电子与空穴分别对电流的贡献, 则:

$$I = ne\mu_n E + pe\mu_p E$$

其中  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别是电子及空穴的迁移率, 而  $n$  与  $p$  大体相等.

测试结果如图 3 所示, 曲线  $a$  表示了等离子体模式, 在电流较小时, 频率的增加较慢, 这是由于仍有部份空穴陷阱的存在, 工作电流超过  $4 \text{mA}$ , 频率随电流迅速增加, 但即便在这时, 器件的电流密度也只有  $10^3 \text{A/cm}^2$ . 处于浓度平方根关系的开始阶段, 估算它的浓度也只有  $10^8 \text{cm}^{-3}$ , 此后频率随工作电流直线上升. 但由于我们制作的器件的封装形式不是按微波器件的要求, 寄生参数会影响频率的进一步提高, 另外结构的散热不好, 会影响较大电流的通过. 从理论上讲, 最好能达到  $10^4 - 10^5 \text{A/cm}^2$  的电流

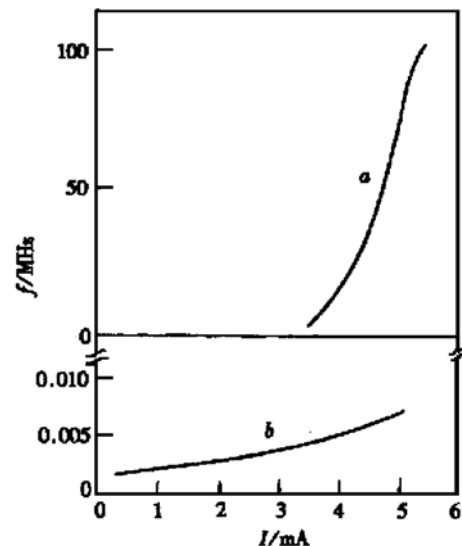


图 3 振荡频率与工作电流的关系 曲线  $a$ : 等离子体模式;  $b$ : 高陷阱模式

FIG. 3 Oscillation Frequency Versus Operation Current

密度,使浓度的平方根关系出现拐点,但即使这样,实验结果的趋势与理论是相符的,当然理论是 $\omega_p \sim n^{1/2}$ 关系,而实验曲线是 $f-I$ 关系.

图3中曲线**b**是高陷阱浓度的情况.频率随工作电流缓慢变化,这是由于随着电流的增加,器件中的电场增加,电场增加改变了空穴的俘获速度所致.这种振荡有很高的效率,一般为电源电压的30%—50%,最高可达70%.

### 3.3 磁场对振荡波形的影响

振荡波形受磁场的影响,是等离子体的一个特点. GaAs 半导体在高电场下离化产生大量的电子空穴对,形成的电子空穴等离子体强烈地依赖于外磁场,在气体等离子体中用外磁场进行控制,而在半

导体中,由于存在晶格及杂质,因此出现的情况比气体中要复杂得多.

#### 3.3.1 磁场对振荡波形幅度的影响

在实验中可以观察到,随着外加电压的增加,在超过雪崩阈值以后,电流迅速增加,这时电压也增加.在电流达到一定值以后,由类似噪声的非相干不稳定波形转变为相干波形,通常是非正弦波形.图4(a)是在没有外磁场时的振荡波形,如果在样品的Z方向加一个N-S均匀磁场,这时振荡波形的幅度增加,振荡频率不变,如图4(b)所示.相反,加一个S-N的均匀磁场,振荡幅度减小,如图4(c)所示.当磁场足够强时,振荡消失,类似于出现振荡前的噪声,产生这一变化所需的磁场,大约是0.1—0.2T量级的磁场,与以前报道的结果相符<sup>[4,5]</sup>.

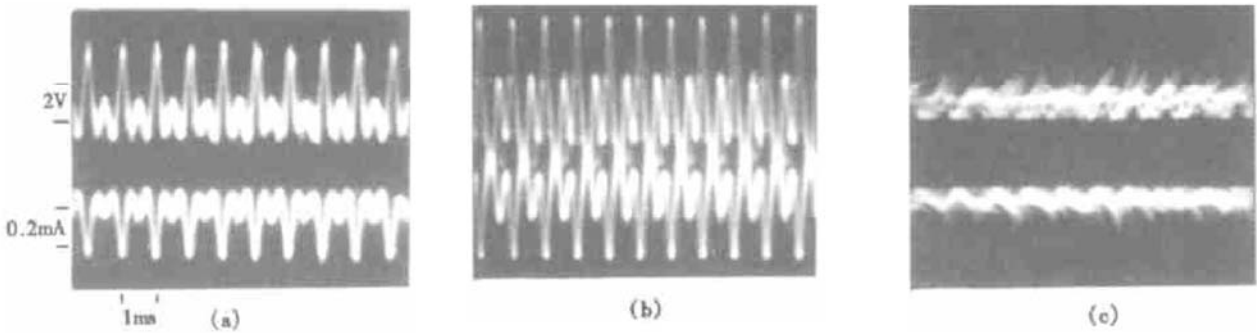


图4 受磁场影响的振荡波形幅度 (a)没有磁场;(b)加N-S外磁场;(c)加S-N外磁场(上:电压波形 $x: t=1\text{ms/cm}$   $y: V=2\text{V/cm}$ ;下:电流波形 $x: t=1\text{ms/cm}$   $y: I=0.2\text{mA/cm}$ )

FIG. 4 Influence of Magnetic Field Density on the Amplitude of Oscillation Waveform

在器件体内存在等离子体的情况,如果在样品的Z方向加一个磁场,在N-S的情况,把表面附近的电子和空穴向样品有源区中心聚集,减少了表面复合效应,使振荡幅度增加.而在S-N时,由于电子和空穴在磁场作用下向表面运动,使等离子体在表面堆积,直到双极扩散反向平衡了Lorentz力.由于表面复合很强,减小了振荡幅度,最后在某一磁场下振荡消失,出现起振前的噪声状态.

#### 3.3.2 磁场对振荡频率的影响

在某些样品中,当外磁场的作用影响到等离子体浓度时,振荡频率就受外磁场的影响,在这些样品中,磁场对振荡的波形及幅度没有大的变化,只有振荡频率产生变化.测量方法与前述相同,当振荡出现后,如频率为 $f$ ,施加N-S磁场时,振荡频率变化到

$f_1$ ,而磁场相反时,振荡频率变化为 $f_2$ .利用这一现象通过频率的变化可以测量磁场的大小,用它来作为远距离测量,非常方便.

当电流密度大于某一值时,所产生的等离子体密度较高,外磁场不能将电子空穴扫向表面,表面复合作用很小,这时外磁场将对体内等离子体的浓度产生影响,从而影响到振荡频率,图5所示是两个不同磁场下的振荡波形.

从图中可以看出,两个不同强度磁场下的波形略有差别.磁场强时,波形更整齐一些,频率也高.由于频率随磁场变化,因此通过测量振荡频率来测量磁场的大小,并判别磁场的方向,可以做成磁传感器.

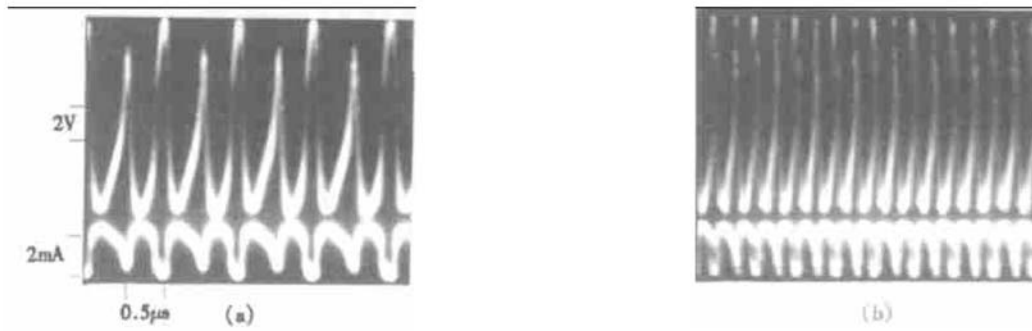


图5 不同磁场强度下的振荡波形 (a)0.05T; (b)0.2T(上: 电压波形  $x:t=0.5\mu\text{s/cm}$   $y:V=2\text{V/cm}$ ; 下: 电流波形  $x:t=0.5\mu\text{s/cm}$   $y:I=2\text{mA/cm}$ )

FIG. 5 Oscillation Waveforms at Various Magnetic Field Densities

### 3.3.3 振荡波形不受磁场的影响

有一类样品在达到阈值起振以后, 有很好的相干波形, 类似于正弦波, 但是这些波形不管是幅度、频率、波形形状均不受外磁场的影响. 在这类样品中由于存在强的空穴陷阱. 当雪崩产生电子和空穴后, 空穴很快被空穴陷阱所陷, 剩下主要是电子. 磁场虽然也能对电子产生偏转的作用, 但不能影响到它的浓度, 这时的振荡主要是由于它的 S 型负阻与外电路调制而引起的, 因此外磁场对这些器件的振荡波形不起作用. 但由于空穴陷阱受光照及温度的影响, 因此器件的波形也受光照及温度的影响.

### 3.4 光辐射波形

在砷化镓器件中, 只要存在电子空穴对, 不管是注入形成或是雪崩形成, 均能产生带间直接辐射. 但特别要强调的是, 从振荡波形的辐射波形中, 可以区别等离子体模式及非等离子体模式.

实验中观察到的等离子体产生的光辐射波形和电流波形是同相位的, 当电流达到最大时, 光电流也达到最大, 说明这时有大量的电子空穴对. 这些电子空穴对有一部分会复合发光, 构成光电流波形, 在电流的整个持续时间内, 光电流也一直保持, 直到电流下降, 光电流也消失. 当电流波形频率及幅度增加时, 光电流的频率及幅度也增加, 因此, 光电流真实地反映了等离子体的产生与振荡过程.

但是在存在陷阱的样品中, 有完全不同的光辐射电流波形, 这时只有当雪崩击穿的瞬间有光辐射出现. 当电子空穴产生以后, 空穴很快被陷, 体内只有电子, 因此光辐射很快消失. 光辐射消失后, 电流波形的电流才开始达到最大值, 因此不管电流波形怎样, 光辐射波形只有很窄的一个脉冲.

为了证实红外辐射是 GaAs 的带间复合辐射, 我们对红外辐射作了光谱分布测量. 由于分光以后讯号很弱, 必须对光电倍增管进行低温冷却, 降低光电倍增管的噪声, 提高讯噪比. 测量的红外辐射谱中有一个极大值. 在室温  $20^\circ\text{C}$  下测得的峰值为  $1.40\text{eV}$  左右, 从而证实这是 GaAs 中电子空穴对的带间复合所引起的.

## 4 结论

本文首次报道了一种新的体效应器件, 即 GaAs 体等离子体器件, 它由很薄的高阻纯度层(约  $1-2\mu\text{m}$ ) 构成. 当外加电压高于雪崩离子化电场后, 体内产生大量的电子空穴等离子体, 这时就有等离子体振荡及光辐射出现, 振荡频率依赖于等离子体浓度. 若这时体内存在大量空穴陷阱, 则出现与陷阱及外电路有关的振荡及瞬间的光辐射, 研究中要区分这两种不同的工作模式. 我们研究的重点是前一种模式, 它有希望做成振荡器及磁敏传感器.

### 参考文献

- [1] V. A. Brodovoi *et al.*, *Sov. Phys. Semicond.*, 1974, **8**(2): 223—225.
- [2] G. P. Peka *et al.*, *Phys. Status Solidi A*, 1974, **26**: 729—735.
- [3] Zheng Yiyang, *Electronic & Design World*, 1999, 71, 49—50 (in Chinese)[郑一阳, *电子产品世界*, 1999, 71, 49—50].
- [4] B. Ancker-Johnson, *Appl. Phys. Lett.*, 1963, **3**: 104.
- [5] B. Ancker-Johnson, *Boeing Scientific Report*, D1-82-0325, Dec. 1963.

## Plasma Oscillation in Purity GaAs

ZHENG Yi-yang

(*Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** A new semiconductor bulk effect device—bulk Plasma device has been developed. It is made up of purity GaAs thin layers ( $1\text{--}2\mu\text{m}$ ). The plasma consisting of some electron-hole pairs occurs in the GaAs thin layer during the avalanche breakdown in a high electric field ( $> 200\text{kV/cm}$ ), which is of wide plasma oscillation frequency that depends on the bias magnetic field. Therefore, it can be widely used in the fabrication of oscillator and the magnetic sensors.

**Key words:** bulk effect/devices; bulk plasma device; avalanche plasma; oscillator and magnetic sensor

**PACC:** 5275

**Article ID:** 0253-4177(2001)10-1329-06

---

ZHENG Yi-yang male, was born in 1936. He is now a professor of Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences. His research interest is in the semiconductor bulk effect devices.

Received 25 December 2000, revised manuscript received 13 April 2001

©2001 The Chinese Institute of Electronics