

150 元 BCCPD 线阵电荷耦合图象传感器

张忠堂 汤学新 张 权 董建民

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文报道了 150 元 BCCPD 线阵电荷耦合图象传感器的结构特点和工作原理;分析了反型层的杂质分布、最大沟道电势与注入剂量、氧化层厚度和栅压等之间的关系。选测了 BCCPD 的转移效率等性能。

一、引 言

BCCPD 电荷耦合图象传感器是一种以光电二极管为光敏元,用埋沟电荷耦合器件(BCCD)传输信号电荷的新型图象传感器。前者能提高传感器的灵敏度、短波响应及其均匀性;后者则能提高转移效率、工作频率。我们研制成功的 150 元 BCCPD 电荷图象传感器具有积分清除和抗光晕功能;传输部分(BCCD)采用四相双层多晶硅交迭栅结构,工作参数容易选配。利用小光点技术测得的转移效率为 99.995%;转移噪声为 206 个电子,比面沟电荷耦合器件(SCCD)低得多;灵敏度为 $1.6 \times 10^5 \text{ V}/\mu\text{J}$,比用相同面积 MOS 电容器作光敏元的同类传感器具有明显的优越性。

二、工作原理和设计考虑

1. 器件结构

图 1 是器件的局部结构图。该器件由 150 元光电二极管列阵(DP),势垒栅(BAG);积分清除栅(ICG),溢出漏(OFD),贮存栅(STG),转移栅(SHG)和四相埋沟读出移位寄存器组成。势垒栅、溢出漏和贮存栅上施加恒定电压,其余栅上加脉冲电压,其驱动脉冲波形和相位关系如图 2 所示。

2. 器件输入部分工作原理

器件的工作可分为两个周期:第一个周期称为清除周期,在此期间,积分清除栅电压 $\phi_{IC} = V_H$ (高电平),转移栅电压 $\phi_{SH} = V_L$ (低电平)。光电二极管接收光子产生的载流子(电子)经势垒栅、贮存栅和积分清除栅,注入溢出漏,如图 3(a)所示。第二个周期称为积分周期,在此期间, $\phi_{IC} = V_L$, $\phi_{SH} = V_L$, 光生载流子经势垒栅进入贮存栅下面的势阱里,并在那里积累贮存,如图 3(b)所示。经积分周期后, $\phi_{SH} = V_H$, $\phi_2 = V_H$, 贮存的电荷经转移栅注入

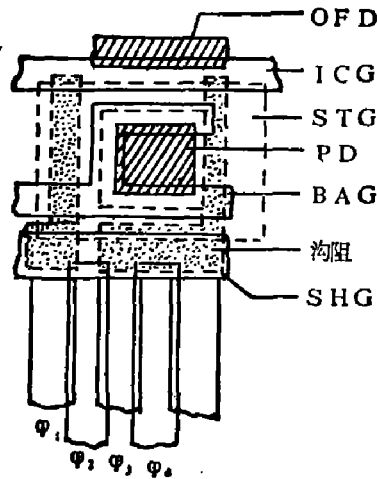


图 1 器件局部结构
Fig. 1 A part of the device

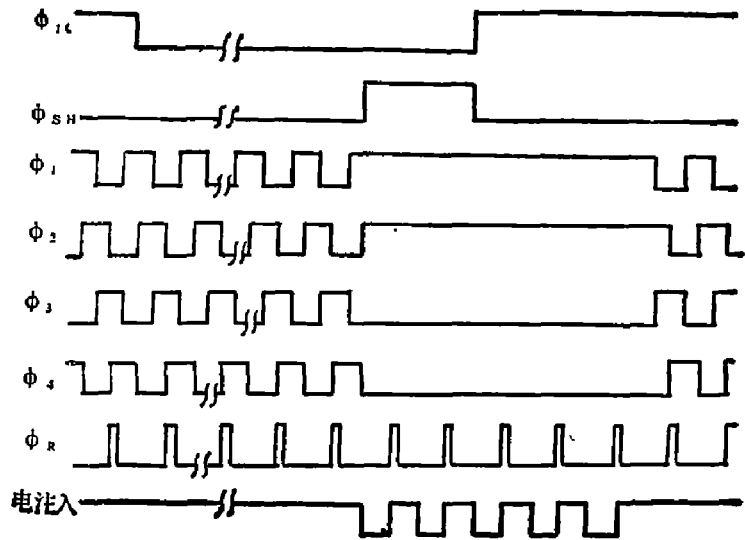


图 2 驱动脉冲波形及相位关系
Fig. 2 The waveform of driving clock pulse and the phase relation

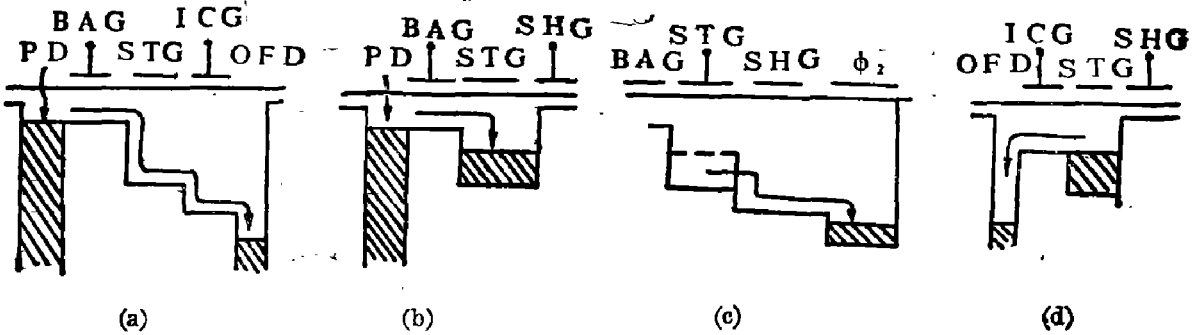


图 3 器件输入部分工作原理示意图
(a) 清除 (b) 贮存 (c) 转移 (d) 抗光晕
Fig. 3 Operational principle for the input part
(a) clearing (b) integration (c) shifting (d) anti-blooming

到读出移位寄存器,如图 3(c)所示。另外,积分清除栅处于低电平状态时,具有抗光晕功能。这时若贮存栅下面的势阱里存储的信号电荷超过势阱容量,那么多余的电荷可通过 ICG 排泄到溢出漏里,如图 3(d)所示。设置在光电二极管光敏元和贮存栅之间的势垒栅,能改善器件的线性^[4]。

3. 版图设计

150 元 BCCPD 的输入部分,如贮存栅和转移栅是面沟结构,而读出移位寄存器则是埋沟结构。设计版图和工艺时,必须考虑两者势阱容量和沟道电势的匹配问题。

(1) 势阱容量的匹配

相同面积的面沟和埋沟贮存电极的势阱容量是不同的。为了使 BCCPD 贮存电极下面的势阱能够容纳贮存在 STG 势阱里的电荷,就必须考虑两者势阱容量的匹配问题。

对于面沟器件,势阱最大容量由下式给出:

$$Q_s = AC_{ox} |\Delta V_s|; \quad (1)$$

式中, A 是贮存栅的面积; C_{ox} 是单位面积氧化层电容; ΔV_s 是满阱和空阱的表面势之差。

对于埋沟器件,直接写出势阱最大容量的表达式是困难的,但可以通过与面沟器件比较

近似地得到^[2]:

$$Q_S/Q_B = \left(1 + \frac{\epsilon_{ox}x_j}{2\epsilon_S d_0}\right) \cdot \frac{A}{B} \quad (2)$$

式中, ϵ_{ox} 、 ϵ_S 分别是 SiO_2 和 Si 的介电常数; x_j 是注入层结深; d_0 是 SiO_2 层厚度; A 和 B 分别是面沟和埋沟的贮存电极面积。

令 $Q_B = Q_S$, 则 B 就可以由 A 求出。

(2) 沟道电势匹配问题

为了实现信号电荷由贮存栅(面沟)通过转移栅(面沟)向读出移位寄存器(埋沟)的转移, 必须考虑面沟和埋沟结构的沟道电势的匹配。

为讨论方便起见, 我们假设衬底均匀掺杂, 其浓度为 N_A ; 注入层磷杂质分布均匀, 其浓度为 N_D (如图 4 所示)。根据耗尽近似, 利用相应的边界条件, 通过解一维泊松方程

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0\epsilon_S} \quad (\rho \text{ 是电荷密度}), \quad (3)$$

可以得到转移栅下面(面沟)沟道电势的表达式

$$\phi_S = V_0 + V - (V_0^2 + 2V_0V)^{1/2}; \quad (4)$$

式中 $V_0 = \epsilon_0\epsilon_S q N_A / C_{ox}^2$, $V = (V_G - V_{FB}) - Q_n / C_{ox}$, C_{ox} 是单位面积氧化层电容, Q_n 是单位面积信号电荷(空沟道时, $Q_n = 0$)。

同理可以得到 BCCD 某一电极下面的沟道电势分布^[8](参见图 4)。

BCCD 某电极下最大沟道电势为

$$\phi_m = \phi_j \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right); \quad (5)$$

ϕ_j 是结处的电势, 可由下式求出:

$$\phi_j + \sqrt{V_{ox}\phi_j} = (V_G - V_{FB}) + V_{imp} \quad (6)$$

式中,

$$V_{ox} = \frac{2qN_A x_j^2}{\epsilon_0\epsilon_S} \left(1 + \frac{\epsilon_S d_0}{\epsilon_{ox} x_j}\right)^2, \quad (7)$$

$$V_{imp} = \frac{qN_D x_j^2}{2\epsilon_0\epsilon_S} \left(1 + \frac{2\epsilon_S d_0}{\epsilon_{ox} x_j}\right), \quad (8)$$

V_{imp} 是加在 N 型层上的电压。

设 $N_A = 8 \times 10^{14} / \text{cm}^3$, $N_D = 8 \times 10^{15} / \text{cm}^3$, $d_{01} = 0.13 \mu\text{m}$, $d_{02} = 0.28 \mu\text{m}$, $V_G = V_{SHG} = V_{\phi_1} = 5 \text{V}$, $V_{FB} = -1.5 \text{V}$ 。利用式 (4) ~ (8), 计算得到的转移栅下面的沟道电势 $\phi_{SA} = 3.9 \text{V}$, $\phi_{SB} = 5.13 \text{V}$; BCCD ϕ_2 电极下面的最大沟道电势 $\phi_{BO} = 12.5 \text{V}$, $\phi_{BD} = 15.5 \text{V}$, 示意图见图 5。显然, 这样的电势分布是合理的, 只要贮存栅下沟道电势不大于 ϕ_{SA} , 信号电荷就能通过转移注入到 BCCD 中来。

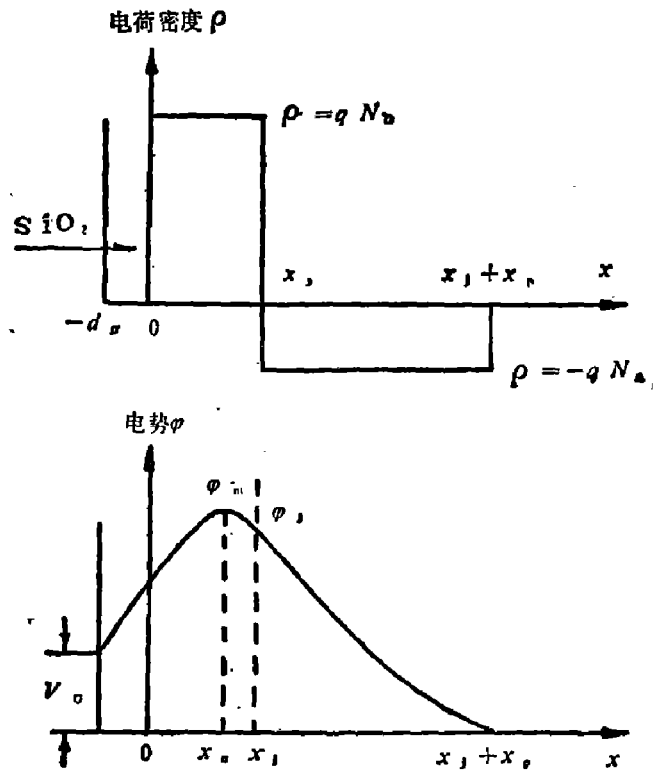


图 4 均匀杂质分布模型的电势分布
Fig. 4 potential distribution of the inversion layer with uniform impurity profile

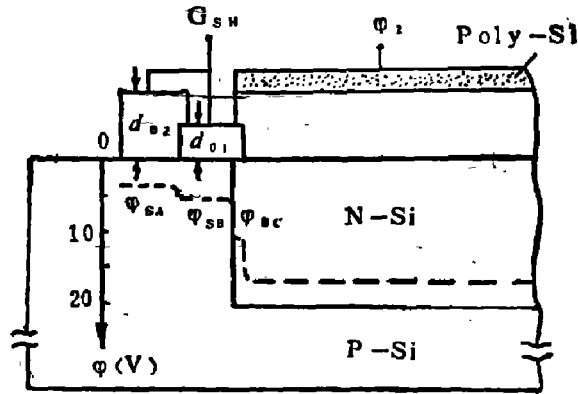


图5 转移栅与 ϕ_2 电极下面的电势分布

Fig. 5 potential distribution under the shifted gate and ϕ_2 electrode

三、BCCD 反型层的杂质分布及其最大沟道电势

1. 反型层中杂质分布的测量

在均匀掺杂的硅衬底表面产生一反型层是埋沟 COD 的关键工艺。反型层的结深和杂质浓度及其分布直接影响器件的工作参数和性能。我们是通过离子注入实现这一工艺的。

为了减少辐射损伤和沟道效应，测试样品随芯片带 500 \AA 氧化层进行磷注入。注入能量为 100 keV ，选择 $7 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 和 $1.4 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 两种剂量。根据 LSS 理论，注入层中的施主杂质浓度可表示为

$$N_D(x) = \frac{N_I}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(x-R_P)^2}{2\sigma^2}\right] - N_A; \quad (9)$$

式中， $\sigma = (\sigma_0^2 + 2Dt)^{1/2}$ 是退火后的标准偏差； σ_0 是退火前的标准偏差； D 是热扩散系数。根据方块电阻的测量和计算， 1170°C 时， $D = 5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$ ； t 是热处理时间； R_P 是从 SiO_2/Si 界面算起的峰值位置。

由 SUPREM-II 程序模拟工艺后得知，第一次高温栅氧化后的低温工艺对杂质分布和结深的影响甚微。为了计算方便，只取 $T = 1170^\circ\text{C}$ 、 $t = 30$ 分钟的栅氧化过程。计算得到的杂质分布如图 6 所示。

精确测量低剂量注入反型层中的杂质分布是比较困难的。我们采用硅阳极氧化层技术，结合四探针测量薄层电阻，利用微分电导法测量了注入杂质的剖面分布。在阳极氧化时，要选择适当的电流和形成电压，保证样品表面氧化均匀。另外，对于浅结低剂量注入磷杂质层，经过热处理后可认为磷杂质全部激活，但是其电导率很低。因此，四探针测量时，要把样品置于暗盒中，探针电流密度要远小于 $1.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ，以避免光注入和电注入载流子对测量的影响。并且随着 N 型层的减薄，电流密度要相应减小。此外，为防止探针压伤样品，在保证接触良好的前提下，探针压力要适当小。测量结果表明：除了表面和结深附近以外，实验数据与利用式 (9) 计算得到的理论值基本相符（见图 6）。表面处的差别可能是高温栅氧化过程中磷原子在表面的积累造成的；结深附近的差别则是四探针测量误差及其局限引起的。

注入层的结深是一个很有用的参数。我们用磨角、滚槽染色，阳极氧化剥层和扫描电镜等多种方法进行了测量和比较，得到两种注入剂量的结深分别为 $0.9 \mu\text{m}$ 和 $1.1 \mu\text{m}$ ，误差小于 10%。

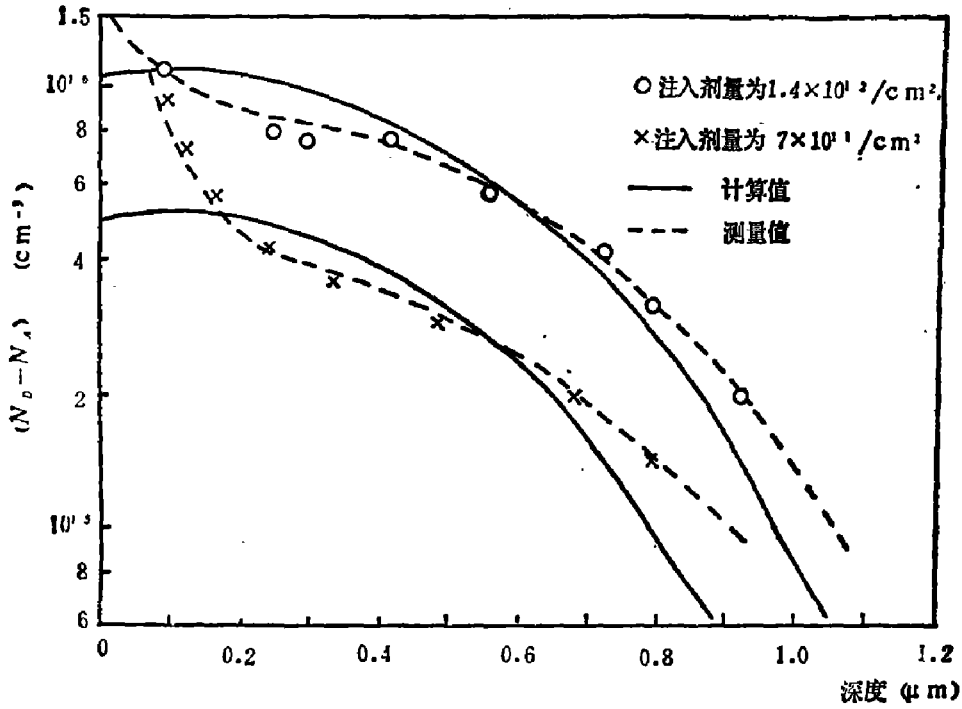


图6 反型层中的杂质分布

Fig. 6 Impurity profile in the inversion layer

2. BCCD 最大沟道电势与栅压的关系

研究最大沟道电势(φ_m)随栅压(V_G)的变化,不仅可以了解势阱分布与注入剂量的关系,而且对正确地选取工作参数也是十分有益的。对于典型的工艺参数,薄栅氧化层厚度 $d_{o1} = 0.13 \mu\text{m}$ 、厚栅氧化层厚度 $d_{o2} = 0.28 \mu\text{m}$; 衬底受主杂质浓度 $N_A = 8 \times 10^{14}/\text{cm}^3$; 注入层平均施主浓度 $\bar{N}_{D1} = 8 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ (对应于 $1.4 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 的注入剂量), $\bar{N}_{D2} = 5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ (对应于 $7 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 的注入剂量), 利用式 (5)、式 (8) 计算, 可得到如图 7 虚线所示的 $\varphi_m - V_G$

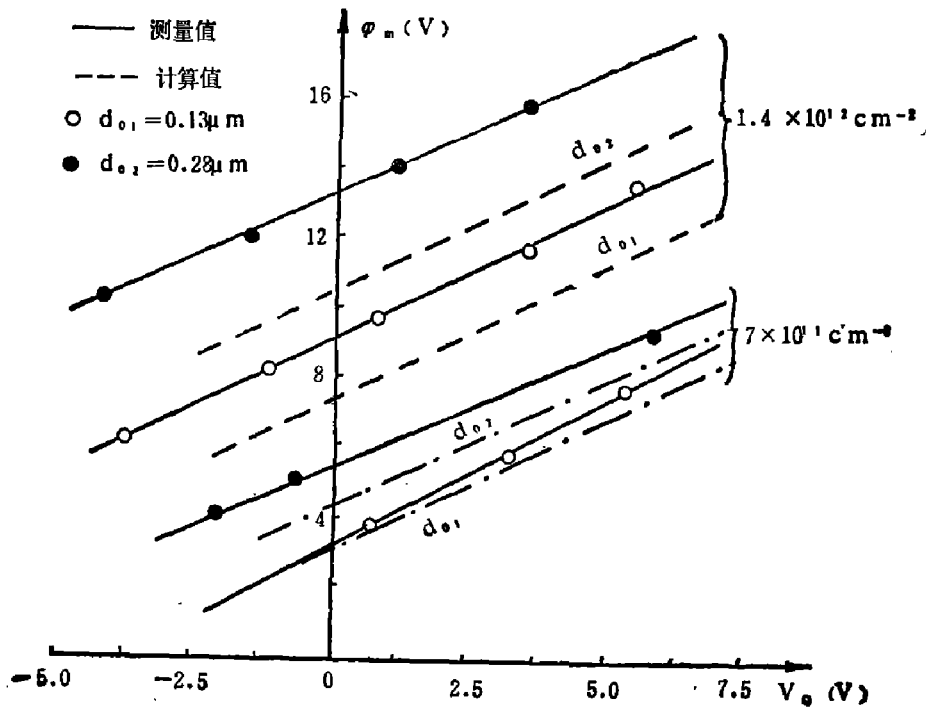


图7 $\varphi_m - V_G$ 关系曲线

Fig. 7 $\varphi_m - V_G$ relation

的关系曲线。

测量 φ_m 随 V_G 的变化, 一般可利用二极管栅控和 MOSFET 的 $O-V$ 和 $I-V$ 特性来实现^{[4][6]}。我们用芯片上的两个 MOSFET 测试陪管测得了 φ_m-V_G 如图 7 中实线所示的关系曲线。

由图 7 可知, 测量曲线与计算曲线的斜率基本一致。分析引起数值误差的原因有: 测量值取得偏高了, 这由 $O-V$ 测量误差所致; 另外计算值中使用的平均杂质浓度 \bar{N}_D 、氧化层厚度 d_{ox} 和结深 x_j 都存在一定的测量误差。

四、BCCPD 的性能

在电荷耦合器件众多的性能指标中, 我们选测了转移效率、由均方根电子数表示的噪声(包括暗电流噪声 n_D , 复位噪声 n_R , 转移噪声 n_T)、用饱和信号电压与均方根噪声电压之比表示的动态范围和灵敏度等几个最重要的参数。在室温下, 时钟频率为 400 kHz 时, 器件性能指标见表 1。

表 1 器件特征

Table 1 Characteristic of the device

特性参数	转移效率	噪 声			动态范围	灵 敏 度
符 号	η	n_D	n_R	n_T	DR	S
典 型 值	99.995%	102 (电子)	346 (电子)	206 (电子)	2100	1.6×10^5 (V/ μ J)

五、结 束 语

埋沟电荷耦合成象器件的性能虽然在许多方面优于同类型面沟器件, 但因其容量小, 多适用于低亮度目标的成象。目前, 使用 150 BCCPD 传感器, 在普通的 CCD 成象系统上获得清晰的图象, 如图 8 所示。另外, 在氦-氖激光束斑光强分布的测量中, 也初步得到较满意的结果。

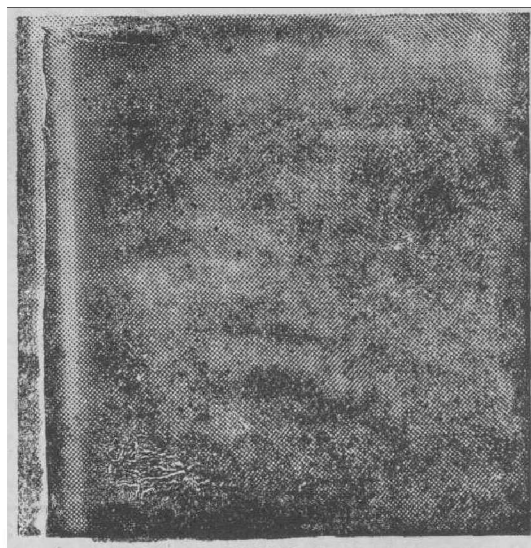


图 8 用 150 元 BCCPD 传感器获得的图象

Fig. 8 Image reproduced by the 150-element BCCPD sensor

致谢——在器件研制过程中,得到我室梁平治、董亮初、郭中原、丁慧、叶国金、冯晓梅、冯志华、凌裕农等同志,十室离子注入组,复旦大学材料研究所陈一同志等大力帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Nubuo Suzuki et al., 1982 *IEEE international Solid-State Circuits Conference*, THPM 13.5.
- [2] Yasuo Ishihara et al., *NEC Research and Development*, 1977, 47, 102.
- [3] M. J. 豪斯, D. V. 摩根, 电荷耦合器件和系统, 1983, 10, 51.
- [4] Tetsuo Yamada et al., *IEEE Trans., Electron. Device*, ED-25(1978), 544.
- [5] Mohson. A. M. et al., *Solid-State Electronics*, 18(1975), 18.

150-ELEMENT BCCPD LINEAR ARRAY IMAGE SENSOR

ZHANG ZHONGTANG, TANG XUOXIN, ZHANG QUAN, DONG JIANMING
(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The principle of operation, structure and characteristics of 150-element buried channel charge-coupled device with a photodiode array (BCCPD) are reported. The relations of impurity profile in the inversion layer and the maximum channel potential versus dose, width of SiO₂ and gate bias are analysed. The characteristics containing transfer efficiency of the device are measured.