

碲镉汞光伏探测器的电流机构及器件建模

陈文桥 *

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘 要 本文主要概述了碲镉汞光伏探测器及其电流机构: 扩散电流、产生复合电流、直接隧道电流、间接隧道电流、表面漏电流以及光电流等。然后根据碲镉汞的电流机构讲述了建立光电集成回路计算机辅助分析的器件模型的步骤。

关键词 碲镉汞光伏探测器 暗电流 光电集成回路 建模 模型 计算机模拟

1 光伏探测器概述

光伏探测器是主要利用光生伏特效应的光电器件。如果固体内部存在一个电场, 而且条件适当, 则本征光吸收所产生的电子-空穴对将会被电场分离, 电子趋向固体的一部分, 空穴趋向另一部分, 两部分之间存在电势差, 这就是光生伏特效应。接通外电路就可以输出电流。

光伏探测器的基本部分是一个 P-N 结光二极管。波长比截止波长短的红外辐射被光电二极管吸收后产生电子-空穴对。如果吸收发生在空间电荷区, 电子和空穴就会立刻被强电场分开并在外电路中产生光电流。如果吸收发生在 N 区或 P 区到结的扩散长度内, 那么光生电子空穴对就必定先扩散到空间电荷区然后在那里被电场分开, 并对外电路贡献光电流。假设信号辐射通量为 Φ_S , 则光电流

$$I = \eta q \phi_s \quad (1)$$

式中, η 为光二极管量子效率, 定义为每个入射光子产生贡献与光电流的数目。在光伏型器件中, 激发的载流子只有穿过 P-N 结才能对光电流有贡献。少数载流子在准中性区域中通过扩散到达 P-N 结之前会由于复合而损失一部分, 表面也存在复合, 因此 η 通常小于 1。为了得到高

的 η 值, 探测器前表面反射系数应该低, 前表面复合速度也要小。一般来说, 结深 d 应控制得比扩散长度小。但有时设计器件使大部分光生载流子产生于衬底部分结的扩散长度内, 也可以得到高的量子效率。因为产生的过剩载流子离前表面远, 表面复合影响小。

光伏型探测器响应速度一般较光电导探测器快, 有利于做高速检测。它既可用于直接探测也可用于外差接收。光伏型器件结构有利于排列成二维面阵。目前正在发展的高灵敏度红外系统采用的混成焦平面列阵(有数千乃至数万个探测元件按二维镶嵌结构排列, 再与硅 CCD 芯片相连构成)则完全采用光伏探测器, 因为光伏器件无需偏置, 因此其焦平面无功耗, 另一方面光伏器件具有比较高的阻抗, 因此可以直接与硅 CCD 的输入级匹配。

光伏探测器的性能参数:

(1) 响应率 $R_\lambda = I_S/\Phi$ 。其中, I_S 为光伏探测器的输出电流。 Φ 为辐射功率。

(2) 噪声。这是指由器件的内在物理过程本身引起的噪声, 它不包括因测量设备处理不当引起的噪声或由外来干扰引起的噪声。

(3) 噪声等效功率 $NEP = V_n/R$ V_n 为探测器的噪声, R 为等效电阻。

(4) 探测率 D^* 。这是用来表征红外探测器工作性能的优值, 归一化到单位面积和单位带宽,

* 2001 级硕士研究生

因而可以比较不同探测器的优劣。

碲镉汞 (MCT) 焦平面阵列器件在短波 ($1\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$)、中波 ($3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$)、长波 ($8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$) 和甚长波 ($12\mu\text{m} \sim 18\mu\text{m}$) 各个波段取得了全面进展。在 $1\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 范围, 高性能 1024×1024 元焦平面器件已经应用, 2048×2048 元器件已研制出来, 有报道说 4096×4096 元焦平面器件的研制也已经开始。在 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 范围, 高性能 640×480 元焦平面已经应用, 256×256 元早已大量生产。在 $8\mu\text{m} \sim 10.5\mu\text{m}$ 范围, 多家公司演示了 640×480 元器件, 高性能 256×256 元器件正投入应用。在对战略和空间应用很重要的甚长波范围, 截止波长为 $15.7\mu\text{m}$ 的 128×128 元焦平面器件也已面世。在线阵列方面, 长波 $480 \times 4(6)$ TDI 扫描焦平面已作为美军标准组件而被大量生产和装备, 空间应用的中波和长波 1500 元高性能器件业已演示。

2 光伏探测器的暗电流和光电流分析

光伏探测器的性能在很大程度上取决于它的 P-N 结特性。P-N 结特性决定了探测器的动态电阻和热噪声, 决定了探测器的性能。零偏压电阻面积乘积 R_0A 是衡量探测器性能的重要指标, 而决定结特性好坏和 R_0A 值大小的是 P-N 结的暗电流机构。目前的应用对 R_0A 值要求非常高。因为一方面, R_0A 决定了探测器的热噪声, 因此在热噪声限下成为限制探测器的主要因素; 另一方面, 为了改善光伏探测器与 Si 信号处理电路之间的耦合, 要求 R_0A 值足够高以提高信号转移效率。

在现有材料和器件工艺水平下, HgCdTe 光电二极管的性能会受到过量暗电流的限制, 且对材料性质和器件制备工艺极为敏感。因此, 研究光伏器件的暗电流机构, 对我们研制和制备光伏探测器有极其重要的意义。

在无光照的情况下, 通过 P-N 结的电流称为暗电流。这种电流主要有以下来源:

- * N 区和 P 区的扩散电流
- * 势垒区的产生 - 复合电流
- * 直接隧道电流
- * 通过深能级的间接复合电流
- * 表面漏电流
- * 其他的欧姆或非欧姆接触电流

2.1 扩散电流

扩散电流是 P-N 结二极管的基本电流机制, 它主要产生于空间电荷区两侧自由产生的热电子 - 空穴对在少子扩散长度内的产生与复合。可以表达为:

$$J_{diff} = J_{0diff} \left[\exp \frac{qv}{KT} - 1 \right] \quad (2)$$

式中

$$J_{0diff} = \frac{qn_i}{N_A} \left[\frac{KTU_e}{q\tau_e} \right] \quad (3)$$

计算扩散电流比较简单, 因为它不像产生 - 复合电流或隧道电流那样对空间电荷区的细节很敏感。在较高温度下, 扩散电流是 HgCdTe 光电二极管暗电流的主要部分。

2.2 空间电荷区的产生 - 复合电流

位于空间电荷区的杂质或缺陷可作为 SHOCKLEY-READ 的产生复合中心, 从而产生结电流。尽管空间电荷区的宽度比少子扩散长度小很多, 但是在低温下, 这种电流会变得十分重要。这是因为扩散电流和产生复合电流都会随温度的下降而下降, 但是产生复合电流下降得慢。当温度降到一定程度时, 产生复合电流就会超过扩散电流, 因此, 必须考虑产生复合电流。空间电荷区的产生复合电流可以表示为:

$$J_{gr} = J_{0gr} \frac{\sin \frac{qv}{2KT}}{\left(1 - \frac{v}{v_{bi}}\right)} \quad (4)$$

式中, v_{bi} 为 PN 结的内建势, ev_{bi} 为零偏压下 N 边和 P 边的费米能级的差。当外加偏压小于 v_{bi} 时, 这个公式有效。公式 f(b) 为:

$$f(b) = \int_0^\infty \frac{du}{u^2 + 2bu + 1} \quad (5)$$

式中

$$b = \exp \left(\frac{-ev}{2KT} \right) \cosh \left[\frac{E_t - E_i}{KT} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\tau_{p0}}{\tau_{n0}} \right) \right] \quad (6)$$

式中, E_t 是产生复合中心的能级, E_i 为固有能级, τ_{p0} , τ_{n0} 是电子和空穴的寿命, 产生复合对暗电流的贡献包括体内复合和表面复合两部分, 表达如下:

$$J_{0gr} = J_{0grb} + J_{0grs} \quad (7)$$

前一项为体内复合部分, 后一项为表面复合的贡献。

2.3 直接隧道电流

当 P-N 结的费米能级在结的两侧都进入能带内时, 电子可以借助隧道效应, 从价带直接进入导带, 形成通过 P-N 结的直接隧道电流。这种电流与禁带 E_g 有强烈的依赖关系, 禁带愈小隧道电流愈大。因而对窄禁带半导体的 P-N 结电流, 必须考虑隧道电流。隧道电流可以表示为:

$$J_{dir} = \frac{q^3(2m^*)^{1/2}E(v_{bi} - v)}{4\pi^3(h/2\pi)^2E_g^{1/2}} \cdot \exp\left(-\frac{\pi(m^*/2)^{1/2}E_g^{3/2}}{2qE(h/2\pi)}\right) \quad (8)$$

式中, m^* 是导带边缘和轻空穴带的电子有效质量, h 是普朗克常数, E 是空间电荷区的电场强度, E_g 是禁带宽度。

2.4 间接隧道电流

在直接隧道电流不能发生的情况下, 由于在结区能带和 Shockley-Read 陷阱之间有交叠, 导带电子也可以借助隧道效应进入深能级缺陷中心, 即首先跃迁到结区的一些陷阱中, 然后由热激发进入价带, 形成通过 P-N 结的陷阱辅助隧道电流, 价带的空穴也有类似的过程。间接隧道电流可以表示为:

$$J_{tsr} = \frac{\pi^2 q^2 m^* W c^2 N t (v_{bi} - v)}{h^3 (E_g - E_t)} \cdot \left(\exp - \frac{3E_g^2}{2PE} f(\partial) \right) \quad (9)$$

式中

$$f(\partial) = \pi/2 + \sin^{-1}(1 - 2\partial) + 2(1 - 2\partial)\partial(1 - \partial) \quad (10)$$

式中, $\partial = E_t/E_g$, Nt 是空间电荷区的缺陷浓度, P 是 Kane 矩阵元, Wc 是从缺陷能级到导

带的跃迁矩阵元, E_t 是缺陷能级。

2.5 表面漏电流

为了提高器件的稳定性和可靠性, 制备光伏探测器必须考虑表面漏电流。目前对表面漏电流的机理知道得还不多, 许多东西还在摸索之中。对于一个栅控 P+-N 结, 当改变栅压时, P 型衬底表面可以处于积累、平带、耗尽和反型四种状态, 相应的表面漏电流大致可以分为三种, 即表面产生复合电流、表面隧道电流和表面沟道电流。

2.5.1 表面产生-复合电流

表面产生复合电流又可分为两部分: 一部分为表面态作为产生复合中心的贡献; 另一部分为表面空间电荷区中的体产生-复合中心的贡献。

- 在平带时 ($V_g = V_{fb}$)

这时, P-N 结耗尽区与表面交界处的表面态起表面产生复合中心的作用。此时的表面产生复合电流为: $I = \frac{1}{2} q s_0 w p_j n_i \left[\exp\left(\frac{qv}{2KT}\right) - 1 \right]$, S_0 为复合速度, $w p_j$ 为结区面积, n_i 为表面态密度。

- 耗尽时 ($V_g > V_{fb}$)

体产生复合电流的贡献为:

$$I_{s,b,q-r} = \frac{1}{2} \frac{q X_d A_G n_i}{\tau_0} \left[\exp\left(\frac{qv}{2KT}\right) - 1 \right] \quad (11)$$

式中, A_G 为耗尽区面积, X_d 为耗尽区宽度。

表面态的贡献为:

$$I_{s,s,g-r} = \frac{1}{2} q s_0 A_G n_i \left[\exp\left(\frac{qv}{2KT}\right) - 1 \right] \quad (12)$$

总的表面产生-复合电流为 $I_{s,g-r} = I_{s,b,g-r} + I_{s,s,g-r}$ 。

- 反型时

在结偏压 V 作用下, 表面强反型的条件是:

$$\varphi_s(inv) = \varphi_s^{inv} - v \quad (13)$$

式中, φ_s^{inv} 为平衡态下表面强反型时的表面势。表面强反型时, 表面耗尽区宽度最大值为:

$$X_{dmax} = \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon_s(\varphi_s^{inv} - v)}{qN_A} \right]^{1/2} \quad (14)$$

这时,若继续增大 V_g ,则 p 区表面将产生 n 型沟道,形成场感应结。

场感应结中的产生复合电流只是体产生复合中心的贡献:

$$I_{s,b,g-r} = \frac{qX_{dmax}A_G n_i}{2\tau_0} \left[\exp\left(\frac{qv}{2KT}\right) - 1 \right] \quad (15)$$

2.5.2 表面隧道电流

对一个金属栅覆盖在结两侧的栅控 N+-P 结,当 $V_g < V_{fb}$ 时,由于 N+-HgCdTe 为重掺杂强简并,因此在 n+ 表面一般不会反型,而只是弱耗尽, P 区表面则积累。结果是, P 区表面的空穴的“堆积”使得 P-N 结耗尽区在表面处被压窄,表面处耗尽区宽度明显减小,造成该处局部电场很强;同时, P 区表面由非简并变为弱简并甚至简并。因而隧道跃迁很容易发生,相当于在表面处感应出一个 n+-p+ 隧道结。这时的 P-N 结特性将受到表面隧道电流的限制,在小偏压甚至零偏压附近就可能发生表面隧道击穿,相应地就会产生表面隧道电流。表面隧道电流可以通过下式积分求出:

$$I_{s,t} = P_J \int_{w_j}^{w_s} \frac{J_t(W)}{dw/dx} dw \quad (16)$$

式中 $J_t(W)$ 为结宽 W 处的隧道电流密度,计算方法与体内隧道电流完全一致。目前还不知道 $W(x)$ 的表达式,还无法对隧道电流进行定量计算。

2.5.3 表面沟道电流

在正栅压作用下,可以使衬底表面反型,导致在 N 型沟道和 P 型衬底之间形成一个与 n+-p 结并联的场感应 n-p 结,这个场感应结有它自己的击穿电压。由于离子注入形成的 n+-p 结介于突变结和线性缓变结之间,而场感应突变结更接近于理想的单边突变结,故场感应结与离子注入结相比,耗尽区宽度小,电场强,而击穿电压低。当反向偏压达到场感应结的击穿电压时,场感应结将首先被击穿而使大的反向电流流过,这个电流沿着反型层沟道穿过场感应结到达衬

底,电流通过时将沿沟道形成电压降。这就是表面沟道电流的形成过程。

光伏探测器的暗电流受偏压、温度、掺杂等外部因素的影响,因而变得相当复杂,要全部考虑清楚各种暗电流的影响非常困难。因此,在不同的外部条件下,可以只考虑主要暗电流,而忽略掉次要的暗电流。一般来说,在正向偏压处,扩散电流起主要作用,在反向中偏压附近由直接隧道电流、间接隧道电流、产生复合电流共同起作用,在反向偏压处,主要是直接隧道电流起作用。

3 光电二极管建模

在当前的电子系统设计(硅工艺)以及集成电路的设计中,以电子计算机辅助设计(CAD)为基础的电子设计自动化(EDA)技术已成为必不可少的工具之一。一般来说,一个能完成较为复杂的超大规模集成电路设计的 EDA 系统应该包括 10 至 20 个 CAD 工具:从高层次的数字电路的自动综合、数字系统仿真、模拟电路仿真,到各种不同层次的版图级的设计和校验工具。它们可以完成自顶向下以及自底向上的 VLSI 设计的各个环节和全部过程。可以看出,计算机辅助设计对现在的电子系统设计是非常重要的。同样,随着集成光电子学的不断前进,光电集成回路(OEIC)计算机辅助设计也必将成为推动 OEIC 加速发展的重要手段,它在缩短设计周期,减少资源耗费,提高器件性能,加速开发进程等方面将发挥重要的作用。

常用的计算机辅助设计工具有 PSPICE、PROTEL、Electronics Workbench 等。不管什么样的模拟工具都必须有一个庞大的模型库,模型的多少决定了模拟工具所能模拟的电路的多少。随着新兴器件的不断出现,模型库的更新速度将无法满足用户的需要。为此,每一种模拟工具都提供了建模功能,利用此功能,用户可以为自己的新型器件建立模型,然后放到库中进行模拟。因此,要想模拟光电子器件,必须建立每个器件的模型并放到模型库中,然后才能模拟集成

光电回路。由此可知,建立器件模型是模拟的关键。

光电集成电路和微电子集成电路是不同的,因为在光电集成电路中,不仅有微电子器件,而且有光电子器件,不仅有电学信息,而且有光学信息。众所周知,电学量一般以“流”的概念来处理,而光学量一般采用“波”的处理方法。因此,要模拟光电子器件,必须要构造光电子器件的电路模型。电路模拟方法的本质是求解关于时间的一阶微分方程,如果光电子器件的性能可以用关于时间的一阶微分方程(组)来描述,那么光电子器件一定可以写成一个等效电路,据此就可以建立器件的模型。

建模的步骤包括(以 PSPICE 为例):建立器件的等效电路模型;把电路模型描述成 PSPICE 子电路形式,利用 PSPICE 提供的功能创建器件模型。

(1) 建立器件的等效电路模型(以碲镉汞光伏探测器为例)。

建立模型的方法:第一种,采用已有的二极管模型并联反向的恒流源,调整模型参数使得零偏阻抗、开路电压及反向电流接近碲镉汞二极管,恒流源作为光电流,如图 1 所示。

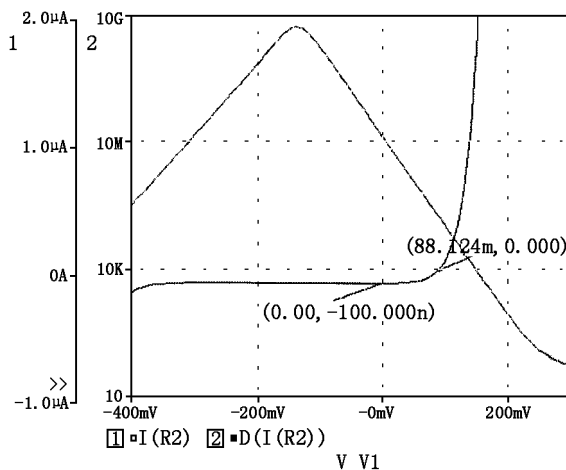


图 1

就模型库里的二极管而言,电流特性是扩散电流加反向击穿的隧道电流,而碲镉汞二极管反向电流主要是产生复合电流,产生复合电流是积

分函数,很难用简单函数来表达。第二种,采用多项式模型。用多项式模拟实际的二极管特性。这种办法在零偏附近差异较大。第三种,采用表格模型。将实际的 I-V 特性数据直接代入。这种模型最直接,但也有局限性,一是数据有限,好像只能代入 50 对数据,二是只能一事一议,不具备普遍性。第四种,根据上面谈到的碲镉汞光伏探测器的电流机理和载流子输运方程,可以得到它的一阶微分方程组,根据方程组就可以构造等效电路模型。第四种方法建立的模型精确度比较高,而且通用性也比较好的,可以随时从库中调出进行各种各样的器件性能模拟,但是第四种方法难度比较大。对建立模型来说,对器件的原理了解得越清楚,考虑的因素越多,建立的模型就越精确,模拟的结果也就越接近实际器件。

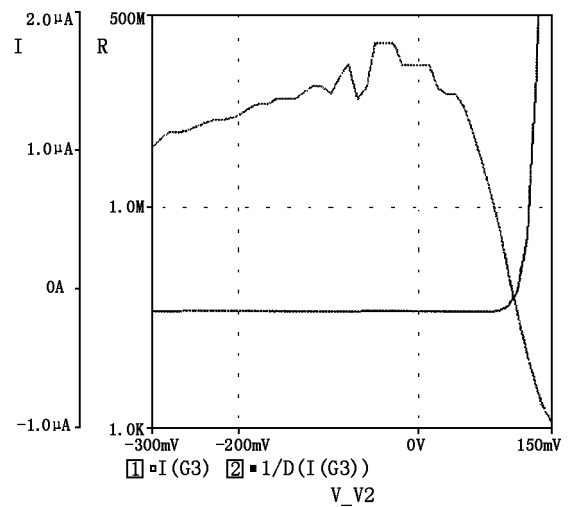


图 2

(2) 把电路模型描述成 PSPICE 子电路形式。PSPICE 提供了强大的电路描述手段,利用这些手段可以把几乎任何一种新兴器件电路模型描述成 PSPICE 子电路形式。主要包括以下步骤:

A. 用参数定义语句定义所有模型参数,以使用户编辑修改模型参数。

B. 用函数描述语句描述模型中涉及到的函数关系。

C. 按照电路的拓扑关系,借助 E 器件或 G 器件描述电路。

(3) 利用 PSPICE 提供的功能创建器件模型并放入库中。

- A. 创建器件等效电路对应符号。
- B. 画等效电路的符号。
- C. 设置器件的属性。
- D. 将器件放入库中

4 总结

本文对碲镉汞光伏探测器的电流机构进行了分析,以图找到提高器件性能的方法。在此基础上,提出将计算机辅助设计工具引进到碲镉汞器件设计中来,提出了几种建立模型的方法,并进行了摸索,以利于提高器件的性能。

参考文献

[1] 赵雅兴. 电子线路 PSPICE 分析与设计, 天津大学出版社.
 [2] 高燕梅, 房蔓楠. SPICE/PSPICE 编程技术, 电子工业出版社.
 [3] L. A. 格拉泽, D. W. 多贝尔普尔. 超大规模集成电路的设计与分析, 科学出版社.

[4] [奥] S. 赛尔勃赫. 半导体器件的分析与模拟, 上海科技文献出版社.
 [5] 高文焕, 王蕙. 模拟电路计算机分析与设计 —— PSPICE 程序应用清华大学出版社.
 [6] 夏武颖. 半导体器件模型与工艺模型, 科学出版社.
 [7] 赵雅兴. 电子器件模型与通用电路模拟程序, 天津大学出版社.
 [8] 高伟涛. PSPICE8.0 电路设计实例精粹 —— 工程师工具软件应用系列国防工业出版社.
 [9] 陈维友, 杨树人, 刘式塘. 光电子器件模型与 OEIC 模型, 国防工业出版社.
 [10] 金西. 超大规模集成电路 CAD 中国科学技术大学出版社.
 [11] 汤定元, 糜正瑜. 光电器件概论, 上海科学技术文献出版社.
 [12] 汤定元. 关于碲镉汞三原材料和期间的一些问题的讨论.
 [13] edited by Willardson. Semiconductor and semimetals, Mercury Cadmium Telluride, Vol. 18.
 [14] A. Rogalski. Analysis of the R_0A product in $n+-p$ $Hg_{1-x}Cd_xTe$ photodiodes, Infrared Phys, Vol. 28, No. 3, 139-153, 1998.
 [15] A. Ynikovsky and Y. Nemirovsky. Trapped-assisted tunneling in mercury cadmium telluride photodiodes, Appl. phys1992. Lett61(3)330.

~~~~~

## 国外专利介绍

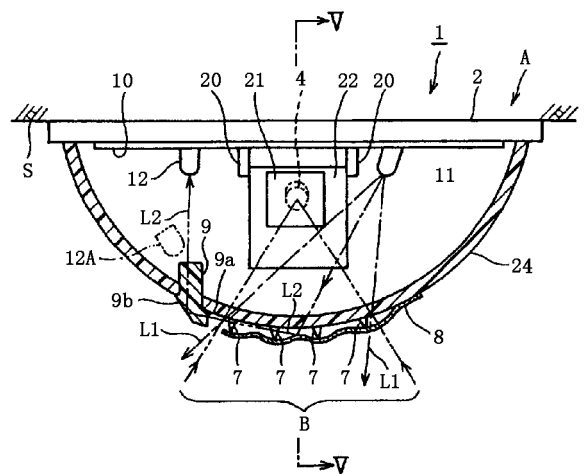
### 具有干扰探测能力的安全传感器

美国专利 US6469625  
(2002 年 10 月 22 日公布)

入侵者探测系统常常会受到诸如透明的反标记或标签之类的障碍物的干扰,这种障碍物能让可见光至近红外区域的光透过,但会阻断远红外光线。因此,入侵者探测系统可能会愚蠢到允许入侵者侵入受被动式红外传感器元件监控的探测区域。例如,当入侵者探测系统因探测区域人员走进走出非常拥挤而不工作时,潜在的入侵者就可能进入探测区域,然后把障碍物贴在光接收部件如传感器透镜或透镜盖上,不让远红外光线进入入侵者探测系统,这样,以后即使入侵者探测系统处于工作状态,该潜在的入侵者就也能进入该探测区域了。

为了克服上述缺点,本发明提供了一种具有干扰探测能力的安全传感器,它能探测为了干扰传感器而故意贴在传感器(1)上的障碍物。

本专利文献共 11 页,其中有 5 张插图。



高 编译