

结型场效应晶体管的光敏特性 及其在紫外检测器上的应用

惠永正 沈 琦 钱 诚 尤绍麟

(中国科学院上海有机化学研究所) (上海无线电十四厂)

摘 要

本文通过合理选择输入阻抗,零偏置时的源漏电流(I_{DSS})和跨导,可从常规的 n 沟道耗尽型结型场效应管中,得到高灵敏度的光敏场效应管.与其它光敏器件比较具有下列优点:线性动态范围大,使用照度范围为 10^{-3} — 10^4 勒克司;光谱响应范围自紫外至近红外;输出阻抗低,并且具有可直接用于测定吸收值的特点.我们在测量光强度或吸收值时,对一些因素如外偏置电压、跨导对光灵敏度的影响作了讨论.并使用这种新型元件,装置了单波长双光路的紫外检测器,已用于自制的高速液相色谱仪上.

结型场效应晶体管是通过改变栅源 P-N 结的偏置电压来控制载流子运动的沟道宽度的半导体器件.关于它的光敏特性已有报道^[1],Bandy 和 Linvill 讨论了光敏场效应管的电荷贮存的工作方式,并提出了设计光敏场效应管的一些观点^[2].我们对于大跨导 n 沟道耗尽型结型场效应晶体管(3DJU 型)的光敏特性进行了研究,并分别讨论了将它作为光量和吸收值检测器件的特点.在此基础上用它制成了用于高速液相色谱的紫外检测器^[3].

一、场效应晶体管的光敏特性

3DJU 型管系在 P 型硅衬底(ρ 1—3 欧姆厘米)上外延薄层 N 型硅(ρ 0.4—0.6 欧姆厘米,厚度为 1—2 微米),经定域硼隔离扩散 P^+ 和定域扩散 N^+ 而形成的.当光照射到由栅源形成的 P-N 结上产生电子-空穴对,由于结电场的作用,电子和空穴被分别推向 P 和 N 区形成光生电动势,其效果即为改变了栅偏压,由此引起了漏源电流 I_D 的变化.由图 1 可看出,在恒定光强度下,漏源电压 V_{DS} 很小时,耗尽区的宽度实际上与 V_{DS} 无关,沟道表现出电阻特性,当 V_{DS} 进一步增加,由于漏区附近 P-N 结的反偏压增加,使电流流过的平均截面积减少,电流渐趋饱和,呈现出场效应管恒流特性曲线的特征.光生电流流经栅极电阻 R_g 产生的电压降的效果如同外加正偏置电压一样,都使 I_D 变大,因而二者的特性曲线族类似.

1. 光量检测性能

如图 1 所示,当栅源间形成了回路,而且外加的负偏压使 P-N 结处于反偏置状态时的等

效电路,可由图 2 表示。 R_{sh} 为栅源间的关联阻抗, $C_{\text{输入}}$ 和 $C_{\text{输出}}$ 分别为输入和输出电容, R_{sd} 为等效沟道电阻, R_s 为源极电阻。光生电流 I_λ 流经 R_g 及 R_{sh} , 如以 ΔV_G 表示在 R_g 上产生的电压降, 则有:

$$\Delta V_G = I_\lambda \cdot \frac{R_g \cdot R_{sh}}{R_g + R_{sh}} \quad (1)$$

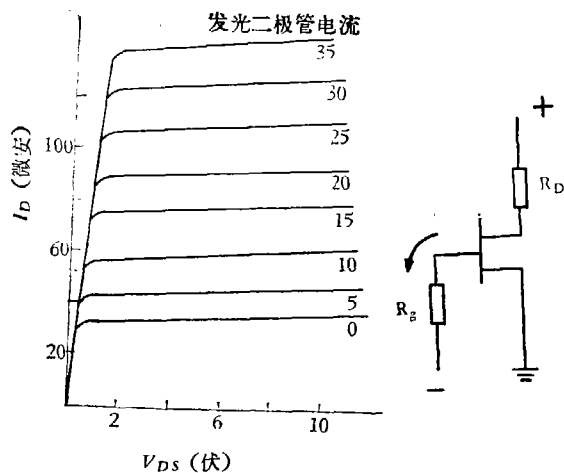


图 1 不同光强度下 3DJU 型场效应管的电压-电流曲线

栅阻 R_g : 10^9 欧姆; 零栅偏压; 光源: 发光二极管
(在 0—40 毫安范围内, 发光强度与电流呈正比)

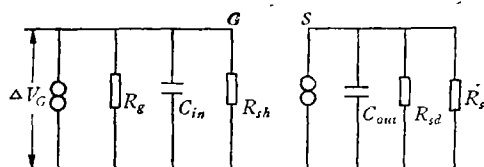


图 2 用作光量检测器的等效电路 (源极跟随器)

在接成源极跟随器时, 对于低频或直流信号的电压增益^[4]

$$A_r \approx \frac{g_m \cdot R_s}{1 + g_m \cdot R_s},$$

其中 g_m 为跨导, 在我们使用的条件 $g_m \cdot R_s \gg 1$, 因而输出电压

$$\Delta V_0 \approx \Delta V_G = \frac{R_g \cdot R_{sh}}{R_g + R_{sh}} \times I_\lambda. \quad (2)$$

此时由于工作在二极管特性曲线上的一个小区域, 因而不管栅源之间是正偏压或负偏压,

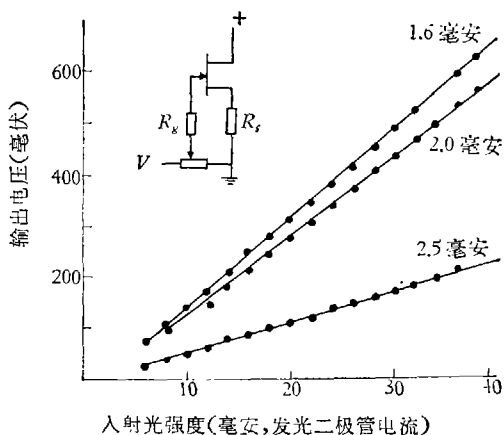


图 3 光敏场效应管的线性输出特性 (源极跟随器)
(光源: 发光二极管)

二极管的非线性特性均可忽略,而考虑成一个与工作点有关的线性电阻 $R_{sh} \parallel R_g$ 。从(1)式可得出电压 ΔV_G 的变化与光强度成线性关系,若工作点改变,则 $R_{sh} \parallel R_g$ 数值也随之改变。从图 3 中可看出,直线的斜率也是相应变化的,当 $R_{sh} \gg R_g$ 时,(2)式可写成

$$\Delta V_G = I_A \cdot R_g. \quad (3)$$

3DJU 型管的 $R_{sh} > 10^{12}$ 欧姆,当选用的 R_g 小于 10^{10} 欧姆时,(3)式即可很好满足,因而 R_g 可以用于光量检测器的灵敏度调节。图 4 即为分别改变 R_g 和入射光照度得出的输出电压结果,线性关系均符合得很好。

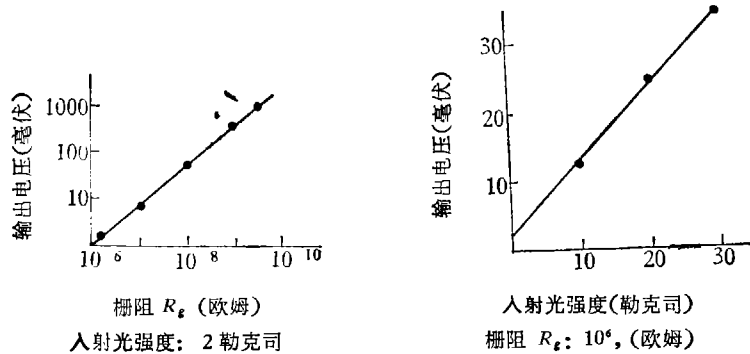


图 4 光量检测器的测定结果

(光源: 钨灯, 上海市计量局标准)

由于 R_g 可用到高达 10^{10} 欧姆, 这样尽管在极低照度下的光生电流 I_A 很小(可小至 10^{-15} 安培), 但 $I_A \cdot R_g$ 仍可相当大, 加上场效应管本身噪声很低的特点, 还可获得相当高的光检测灵敏度, 其灵敏度在 1 伏/勒克司左右, 可检测的最低光强度约为 10^{-3} 勒克司。使用 1000 瓦的碘钨灯, 加上不同密度的中性滤色片得到不同的高照度条件, 经标准钠光灯校正, 算得在高达 1.12×10^4 勒克司的照度下, 测得的光电信号与从低照度得到的外推值相比误差在 10% 以内。线性动态范围可达七个数量级, 远远高于一般光敏器件的范围。反复用强光和弱光交替照射, 也未发生损坏现象, 这是区别于光电管和光电倍增管的一个显著优点。

从图 1 中光敏特性曲线族中已可看出, 曲线平坦部分的间隔是随光强度有一定的变化, 曲线族离横座标的相对位置可通过改变外加偏压而上下调节。有些场效应管的 I_{DSS} (栅源短路时漏极电流) 较大, 使得 $V_{DS} - I_D$ 特性曲线族离横座标较远, 这样由于可用之负载阻抗不够高的原因使光灵敏度降低。但是由于光强对特性曲线族的影响与正向偏置电压的效果相当, 因此可外加较高的反偏置电压, 使特性曲线族靠近横轴。这样就可使用较高的负载阻抗, 而得到高的光灵敏度, 却并没有增加非线性失真。图 5 中 $A'B$ 即表示了增益较高的情况, 这样不管场效应管的 I_{DSS} 多大, 在用作漏极输出的场

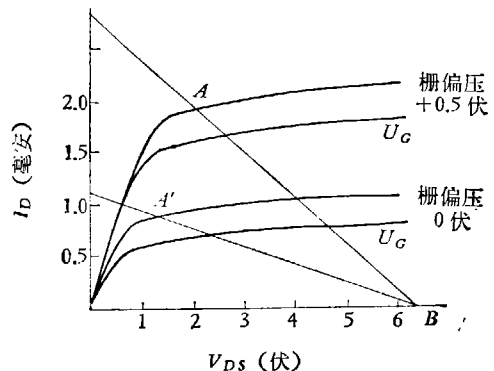


图 5 外加栅偏压对灵敏度的影响

(测定条件同图 1)

效应放大器测量光强度时，总可得到最佳的光灵敏度。

但如果栅对源处于正偏置时，则输出电压随光强度的变化并不总保持线性关系，因为此时必须考虑二极管的非线性特性，这样呈现了如图 6 所示的与工作点有关的特性。 I_{Dm} 为测定条件下的最大漏源电流， I_{DSS} 为无光照条件下零偏置时的漏极电流。当 $I_{Dm} < I_{DSS}$ 输出电压与光照强度呈线性关系（起始端的弯曲是由于跨导的非线性失真引起的）。而当 $I_{Dm} > I_{DSS}$ 时栅源 P-N 结处于正向导通，二极管特性使光强度高时的信号大大压缩，而表现出输出电压与光强度的变化的非线性行为。

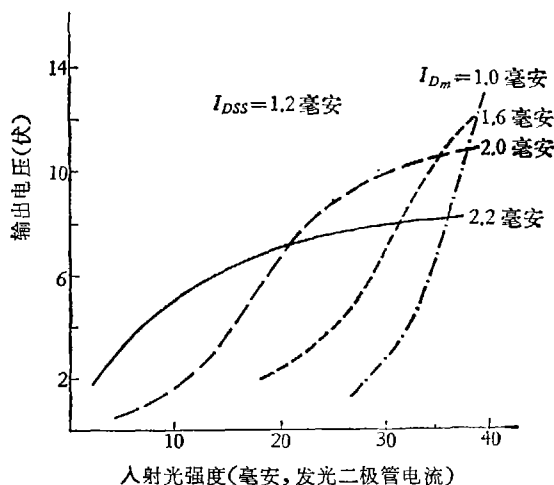


图 6 光敏场效应管漏极输出的非线性特性
(光源: 发光二极管, 栅阻: 10^9 欧姆)

2. 吸收值检测性能

将场效应管栅极悬空, 栅极即处于源漏分布电场中间, 所以栅源的 P-N 结为正偏置, 其等效线路应如图 7 所示, R_D 为源漏沟导电阻, R_L 为负载电阻, 由于二极管的正向内阻远远小于 R_{sh} , 此时可不考虑 R_{sh} 的影响, 这样光生电动势 ΔV_G 和流经栅源 P-N 结的电流 i 之间的关系满足下式:

$$i = qg(L_p + L_n)[\exp(-q\Delta V_G/kT) - 1]. \quad (4)$$

其中 $L_p \cdot L_n$ 分别是结中电子和空穴的扩散长度, g 为载流子热产生速度, q 为电子电量, k 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度。同时, 光生电流 I_k 应为:

$$I_k = qu(L_p + L_n). \quad (5)$$

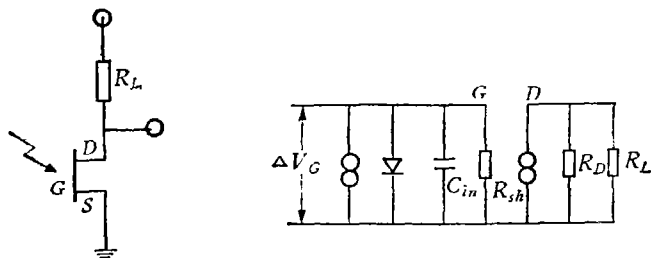


图 7 用作吸收值检测器的等效电路

其中 u 为每秒产生的空穴电子对数目, 在一定波长时它与入射光强度成正比, 达到平衡时,

$$qu(L_p + L_n) = qg(L_p + L_n)[\exp(-q\Delta V_G/kT) - 1]. \quad (6)$$

如果忽略光生电流在结中分布的不均匀性, 则由 (6) 式可推导得光照射引起的栅极电压变化 ΔV_G ,

$$\Delta V_G = (kT/q) \ln \left(1 + \frac{u}{g} \right); \quad (7)$$

当 $u \gg g$, 漏极输出电压 ΔV_0 为:

$$\Delta V_0 = (kT/q) \ln \left(\frac{u}{g} \right) g_m(R_L \parallel R_D) = K \ln I + K_0. \quad (8)$$

I 为入射光强度, K, K_0 为与晶体管本身特性和使用条件有关的常数。

这样即得到了与入射光强度的对数值即吸收值呈正比的输出电压, 图 8 即为在上述条件下测得的实验结果, 在 0—1.0 的吸收值范围内线性很好。

在作为吸收值测定器件工作时, 光敏特性曲线随光强度的等幅变化而趋于密集, 见图 9。在确定了电压 B 以后可看出, 改变负载电阻 R_L 值, 负载线亦会从 A 逐渐经 A' 移至 A'' 。由于在 A 处负载线与特性曲线族几乎正交, 而在 A'' 处则工作在起始区, 故增益均极低, 只有处于 A' 那样的位置才会有较高的灵敏度, 因而应具有最佳工作点。图 10 的实测数据肯定了这个结果。由此还可推论 I_{DSS} 亦应对光灵敏度有所影响。当 I_{DSS} 较小时, 曲线族靠近横轴, 可选取的最佳负载电阻 R_L 也越大, 灵敏度也会随之变大。

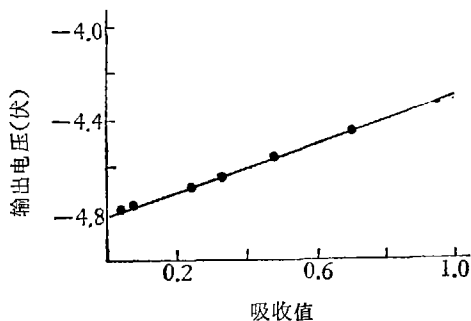


图 8 吸收值检测器的测定结果
(光源: 低压汞灯)

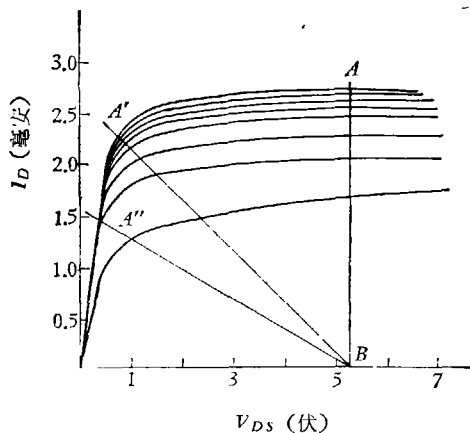


图 9 光敏场效应管用作测定吸收值的光敏特性曲线族
(光源: 发光二极管)

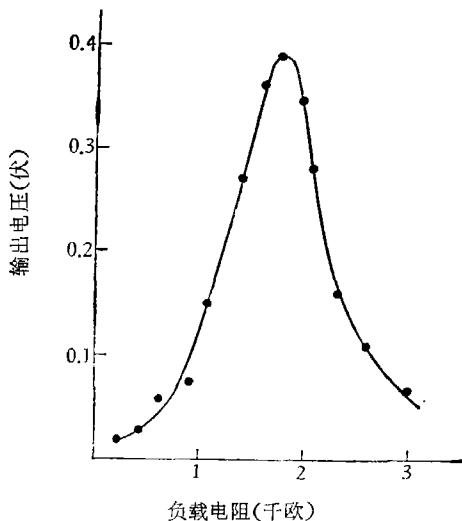


图 10 输出电压和负载电阻 R_L 的关系
(光强度恒定)
(光源: 发光二极管)

综上所述,为了满足测定吸收值线性度和提高灵敏度的需要,选择光敏场效应管的依据是 I_{DSS} 小,输入阻抗大,跨导大。我们使用的管子参数是 $I_{DSS} < 1$ 毫安,输入阻抗 $\geq 10^{11}$ 欧姆,跨导 $\cong 3000$ 微姆欧。

3. 光谱响应范围

光谱响应范围取决于半导体材料的禁带宽度 E_g ,对光电效应起作用的有效入射光波长应为 $\lambda < hc/E_g$, h 为普朗克常数, c 为光速。由硅的禁带宽度 $E_g \cong 1.1$ 电子伏特,算得有效入射光波长上限应为 1.2 微米。我们取得结果与它是一致的,当入射光波长变短,晶格对光子的吸收也不断增加。同时在表面产生的电子-空穴对在到达 P-N 结前亦已大部复合,故在达到最高点后响应迅速下降。用氘灯和钨灯作光源的单色器,对 3DJU 管测得的光谱响应曲线见图 11。所用的 3DJU 管,结深度在 2 微米左右,其短波端的吸收比结深度分别为 1.0 微米、0.5 微米的硅光电池更为显著。从以对数尺度表示的响应曲线中看出,即使在波长低至 210 毫微米处 3DJU 管尚还有一定的响应。

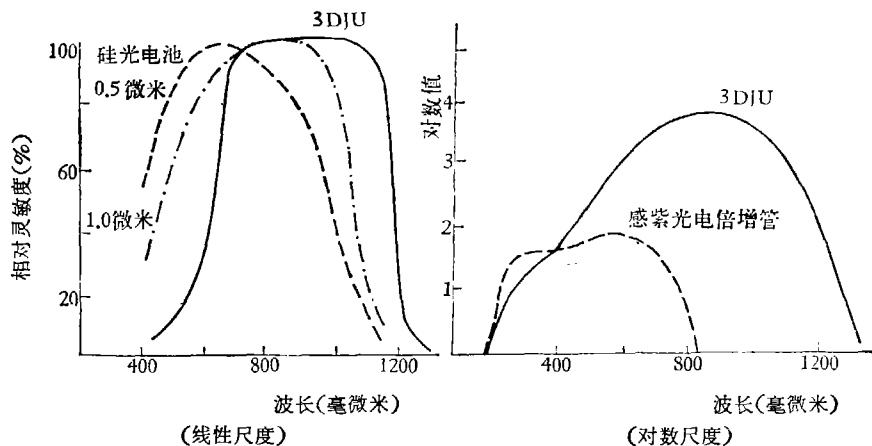


图 11 光谱响应曲线
(光源: 氘灯 200—400 毫微米,钨灯 400—1400 毫微米)

4. 响应时间

在接成源极跟随器作为光量检测用时,从等效电路可看出响应时间取决于输入回路结电容 C_{in} 和栅极电阻 R_g 之乘积。3DJU 型管 C_{in} 在 10^{-11} 法拉左右,如 R_g 为 10^9 欧姆,则响应时间 $\tau < 10^{-11} \times 10^9 = 10^{-2}$ 秒,而接成漏极输出的放大器,则由于密勒电容效应的缘故而使输入电容增大了。增大倍数与放大级的电压增益相当,使响应速度显著减慢^[4]。作为吸收值检测方式,栅源间不存在其它回路,光生电动势的建立和消失时间分别与栅源 P-N 结的充电

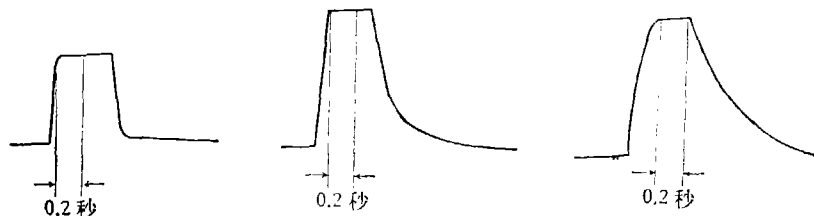


图 12 光敏场效应管测定吸收值时的响应时间

和放电时间有关。从图 12 可看出,光信号的建立速度大于漏泄速度。这是由于建立速度直接与结电场作用下的飘移过程有关,因此快些,而漏泄之所以慢是由于与扩散过程有关的缘故。从图中还发现响应速度随管子的 I_{DSS} 变小而减慢,考虑到 I_{DSS} 小意味着沟道中载流子数目少,这样沟道电阻大使阻容时间常数长了,因此得到这样的结果是可以理解的。

二、光敏场效应管紫外检测器

用 3DJU 型管制成的单波长 (254 毫微米) 紫外检测器的结构如图 13 所示。使用 GP2Hg 指型低压汞灯为紫外光源,通过样品和参照二个流动池的光束,经紫外滤色片和石英透镜分别会聚在光敏场效应管的管芯上,得出的光电信号经图 14 所示的电路差分后记录。

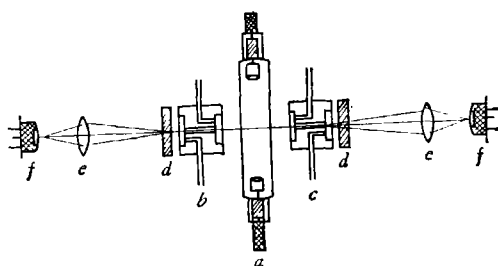


图 13 紫外检测器的结构

(a. 汞灯, b. 样品池, c. 参照池, d. 紫外滤色片,
e. 石英透镜, f. 光敏场效应管)

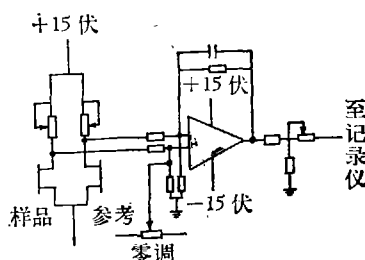


图 14 紫外检测器的电路

紫外检测器达到的指标为对数线性范围 0—0.64 吸收值; 噪音 $< \pm 5 \times 10^{-5}$ 吸收值; 漂移 $< 5 \times 10^{-3}$ 吸收值/小时。为核准检测器的线性工作范围, 用萘作样品测定的结果列于图 15 上。萘检出灵敏度达 8×10^{-9} 克/毫升。

用 3—5 微米的堆积硅珠装填的色谱柱, 具有较高的柱分离效率, 用含 2% 氯仿的正己烷为移动相, 对苯及其衍生物进行了高速液相分离, 在数分钟内四个样品得到了很好的分离, 结果见图 16。这表明光敏场效应管紫外检测器是满足使用要求的。自图 11 中可看出 254 毫微米

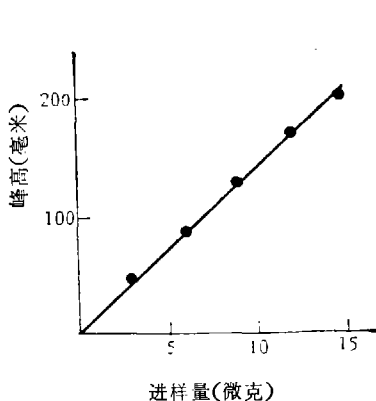


图 15 进样量与峰高的线性关系

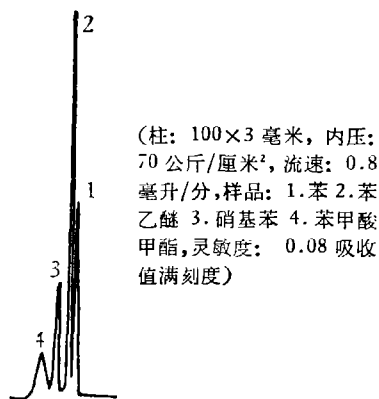


图 16 苯及其衍生物的快速分离

虽是处于3DJU管可工作区域的下限,但即使如此还可将其直接用至要求相当高的紫外检出器上,而可省略在用硅光电池等器件时,先得采取将紫外辐射转换成荧光再检测那样的间接方式。

三、讨 论

场效应管的跨导 g_m 会随工作点位置不同而变化,这样即使在栅极产生光生电动势是与入射光强度分别呈线性或对数的对应关系。但在漏极得出的信号就有可能失真。尤其在光量变化幅度大时,这种情况更为严重。图 17 的 a、b 分别是吸收值检测工作方式时栅极和漏极电位随光强度的变化情况。但已如上所述,对于接成源极跟随器的线性工作方式,跨导的影响可基本消除。而对于对数工作方式,则由于栅源回路中不存在反馈网络的关系,跨导的非线性影响总是存在的,因而在使用中需选择在所用之动态范围内跨导变化不大的管子。

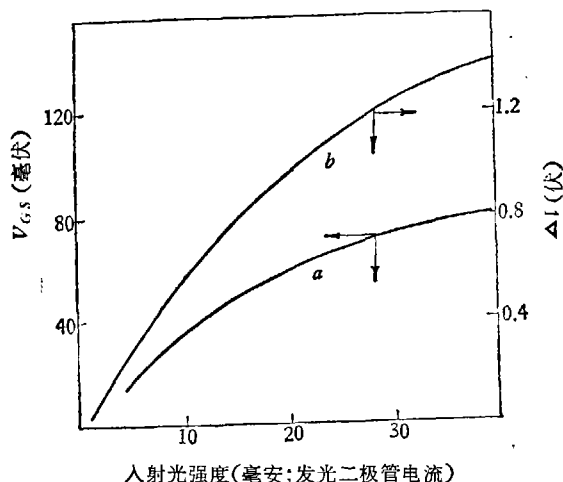


图 17 跨导的非线性引起的输出电压失真
(a. 栅极电压的变化, b. 漏极输出电压的变化;光源: 发光二极管)

在 250 毫微米波长,硅的光子吸收系数大于 10^6 /厘米,反射率大于 60%^[1]。就平面型的硅光电池而言一般已无响应了,3DJU 型管所以尚有响应可能是由于在栅区结构中,同时存在平行于入射光方向和垂直于入射光方向的 P-N 结区的原因。在短波区域,平行于入射光的 P-N 结起到了相当于减少结深度的作用,因此为了改善紫外响应的性能,需要减少结深度和增加 SiO 防反射涂层以及选择适当的扩散浓度来实现。在我们工作结束以后看到文献 [6] 报道了通过上述措施而制成了在紫外区域有很高灵敏度的光敏场效应管。

参 考 文 献

- [1] Kluge, J. E., *Electrical Design News*, 11(1966), 82—83.
Shipley, M., *Solid-state Design*, 5(1964), 28—30.
———, *Electron Design*, 12(1964), 76.
- [2] Bandy, S. G. & Linvill, J. G., *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-20, 1973, 793—801.
- [3] 中国科学院上海有机化学研究所,上海无线电十四厂紫外检测器研究小组,化学学报,35(1977),61—68.
- [4] Todd, C. D., *Junction Field-effect Transistors*, N. Y., Wiley, 1968, Chapter 2.
- [5] Grove, A. S., *Physics and Technology of Semiconductor Devices*, N. Y., Wiley, 1967.
- [6] Muench, W. von. Gessert, C. & Koeniger, M. E., *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-23, 1976, 1203—1207.