

串音对 InSb 光伏型红外探测器 列阵性能的影响

王新德 胡文军 沈寿珍

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文将 InSb 光伏型红外探测器列阵简化成线性电阻网络, 通过这个方法, 讨论了串音对列阵器件各探测元的结电阻、响应率及探测率的影响。结果表明, 在有串音的情况下, 实测的探测元结电阻变小, 探测率变大, 而响应率可能变大, 也可能变小。

一、引言

在研制 InSb 光伏型红外探测器列阵(以下简称探测器列阵)过程中遇到的最大问题之一是串音, 它使器件的分辨率大大下降, 从而严重地影响着红外仪器的成像质量。某些隔离措施可以改善器件的串音程度, 文献[1]报道的就是其中的一种方法。用这种方法制作的探测器列阵, 经多种方法鉴定证明, 串音率已下降到 1% 以下。但是, 用常规方法实测, 某些性能参数却比串音器件差。我们认为, 这是一种虚假现象。说明串音对列阵器件的实测性能参数有影响。

串音有两种, 一种是光学串音, 另一种是电学串音。实验表明, 用我们的 InSb 材料制成的探测器列阵, 光学串音很小。本文以电学串音为例, 讨论串音对器件性能的影响。为方便起见, 在讨论中不涉及具体的串音机制。

二、串音率的定义

串音的测量方法有两种, 一种是光学法, 即采用小光点装置进行测量, 另一种是电学法。一般来说, 光学法可以同时反映器件的光学串音与电学串音, 而电学法只反映器件的电学串音。我们采用电学法, 将微弱的低频正弦恒流信号(模拟弱信号工作状态)加到探测器列阵某一探测元 i 的输入端上, 然后在各探测元的输出端测量, 得到一组电压值 $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}$ 。再将恒流信号施于另一探测元的输入端, 测得另一组电压值。 n 个探测元可以测得 n 组电压值。这 n 组电压值可以排列成如下的矩阵:

本文 1981 年 7 月 18 日收到。修改稿 1982 年 6 月 21 日收到。

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{21} & \cdots & v_{i1} & \cdots & v_{n1} \\ v_{12} & v_{22} & \cdots & v_{i2} & \cdots & v_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ v_{1j} & v_{2j} & \cdots & v_{ij} & \cdots & v_{nj} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ v_{1n} & v_{2n} & \cdots & v_{in} & \cdots & v_{nn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中, v_{ij} 为第 i 个探测元对第 j 个探测元的串音电压 ($i \neq j$)。这是一个与串音电压有关的矩阵, 我们称之为串音电压矩阵。由线性电路的互易性可知^[9], 该矩阵一定是一个对称矩阵, 即 $v_{ij} = v_{ji}$, 我们的测量也证实了这一点, 因而, 利用这一性质可以检验测量的正确性。

一般来说, 我们需要知道串音的相对值, 为此定义 $\alpha_{ij} = v_{ij}/v_{ii}$ 为第 i 个探测元对第 j 个探测元的电压串音率 (简称串音率)。一个 n 元探测器列阵的串音率可表示成如下矩阵形式:

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{21} & \cdots & \alpha_{i1} & \cdots & \alpha_{n1} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{i2} & \cdots & \alpha_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{1j} & \alpha_{2j} & \cdots & \alpha_{ij} & \cdots & \alpha_{nj} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{1n} & \alpha_{2n} & \cdots & \alpha_{in} & \cdots & \alpha_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v_{11}}{v_{11}} & \frac{v_{21}}{v_{22}} & \cdots & \frac{v_{i1}}{v_{ii}} & \cdots & \frac{v_{n1}}{v_{nn}} \\ \frac{v_{12}}{v_{11}} & \frac{v_{22}}{v_{22}} & \cdots & \frac{v_{i2}}{v_{ii}} & \cdots & \frac{v_{n2}}{v_{nn}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{v_{1j}}{v_{11}} & \frac{v_{2j}}{v_{22}} & \cdots & \frac{v_{ij}}{v_{ii}} & \cdots & \frac{v_{nj}}{v_{nn}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{v_{1n}}{v_{11}} & \frac{v_{2n}}{v_{22}} & \cdots & \frac{v_{in}}{v_{ii}} & \cdots & \frac{v_{nn}}{v_{nn}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中, 矩阵的对角元始终等于 1, 在形式上, 不妨把它理解为对自身的串音率。要注意的是, 串音率矩阵一般是不对称的。

三、等效电路

探测器列阵实际上是由同一片基底上的许多具有光伏特性的 $p-n$ 结排列而成的。不管器件有没有串音, 均可简化而等效成如图 1 所示的线性电阻网络。这种简化的前提是: 1) 低频。此时可以忽略与频率有关的分布参数的影响, 如电感与电容。2) 确定的工作状态。此时可以将 $p-n$ 结看作为一只具有确定阻值的动态电阻。3) 小信号。此时信号的变化对器件的工作点没有影响。这三个条件对于大多数的应用都能满足。

图中, R_1, R_2, \cdots, R_n 分别与列阵各探测元的实际结电阻相等效, $R_{12}, R_{23}, \cdots, R_{n-1,n}$ 分别与探测元之间的漏电阻相等效。对于无串音器件, $R_{12}, R_{23}, \cdots, R_{n-1,n}$ 为无穷大, 实测的结电阻就是它的真正结电阻。而对于串音器件, 由于存在漏电阻, 实测的结电阻应等于从 D_1, D_2, \cdots, D_n 端看进去的电阻, 分别记为 $[R_1], [R_2], \cdots, [R_n]$ 。

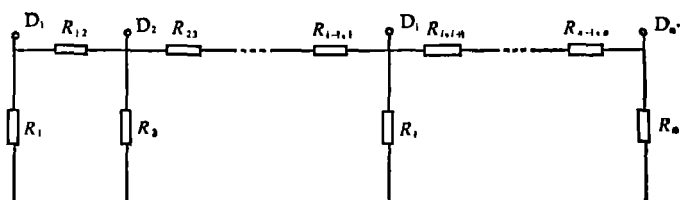


图 1 n 元探测器列阵等效电路

四、串音对器件性能的影响

1. 对结电阻的影响

为了表明串音对器件结电阻的影响,引入结电阻变化因子 η_R :

$$\eta_R \equiv [R]/R_0. \quad (3)$$

对于串音器件,实测结电阻 $[R_1], [R_2], \dots, [R_n]$ 可用下述矩阵表示:

$$\begin{pmatrix} [R_1] \\ [R_2] \\ \vdots \\ [R_i] \\ \vdots \\ [R_n] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v_{11}}{\tilde{i}} \\ \frac{v_{22}}{\tilde{i}} \\ \vdots \\ \frac{v_{ii}}{\tilde{i}} \\ \vdots \\ \frac{v_{nn}}{\tilde{i}} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中 \tilde{i} 为测量用的恒定交流电流。由等效电路可知,当恒流电流 \tilde{i} 施于某一探测元输入端时,所有探测元都将有电流流过,这些电流之和等于 \tilde{i} , 即:

$$\sum_{j=1}^n \tilde{i}_{ij} = \sum_{j=1}^n v_{ij}/R_j = \tilde{i}_0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

由克莱姆法则求得:

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_i \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\det V}{\tilde{i} \det V_1} \\ \frac{\det V}{\tilde{i} \det V_2} \\ \vdots \\ \frac{\det V}{\tilde{i} \det V_i} \\ \vdots \\ \frac{\det V}{\tilde{i} \det V_n} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

其中, $\det V$ 为矩阵 V 所对应的行列式, $\det V_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是以 \tilde{i} 替换 V 中第 i 列各矩阵元后得到的 n 阶行列式。由式(6)、式(3)与式(4)得:

$$\begin{pmatrix} \eta_{R_1} \\ \eta_{R_2} \\ \vdots \\ \eta_{R_i} \\ \vdots \\ \eta_{R_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{[R_1]}{R_1} \\ \frac{[R_2]}{R_2} \\ \vdots \\ \frac{[R_i]}{R_i} \\ \vdots \\ \frac{[R_n]}{R_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v_{11} \det V_1}{\det V} \\ \frac{v_{22} \det V_2}{\det V} \\ \vdots \\ \frac{v_{ii} \det V_i}{\det V} \\ \vdots \\ \frac{v_{nn} \det V_n}{\det V} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

计算表明,有串音时, η_R 总是小于 1, 无串音时, $\eta_R=1$ 。说明串音使实测结电阻变小。

2. 对响应率的影响

响应率 $\mathcal{R} = v_s/P$, 其中 v_s 表示在辐射功率为 P 的光源照射下, 探测元输出的信号电压。通常以黑体作为辐射源进行测量。它同时照射着所有探测元。因此对于串音器件, 从某一探测元实测的响应率是所有探测元共同贡献的结果, 这将对器件的响应率产生影响。我们引入响应率变化因子 $\eta_{\mathcal{R}}$:

$$\eta_{\mathcal{R}} \equiv \mathcal{R}'/\mathcal{R}, \quad (8)$$

式中, \mathcal{R}' 为串音器件在黑体照射下某一探测元的实测响应率, \mathcal{R} 为在相同黑体照射下无串音器件相应探测元的响应率。由于每一探测元有相同的光敏面积, 上式可简化成:

$$\eta_{\mathcal{R}} = v'_s/v_s, \quad (9)$$

其中, v'_s 、 v_s 分别为与 \mathcal{R}' 、 \mathcal{R} 对应的信号电压。利用式(3)以及信号电压与光电流、结电阻等的关系, 上式又可化成:

$$\eta_{\mathcal{R}} = \eta_R \cdot v''_s/v'_s, \quad (10)$$

其中, v''_s 为串音器件某一探测元受辐照, 而其它各元均无辐照时该元的信号电压。 v''_s 与 v'_s 满足如下方程组:

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{21} & \cdots & \alpha_{i1} & \cdots & \alpha_{n1} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{i2} & \cdots & \alpha_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{1j} & \alpha_{2j} & \cdots & \alpha_{ij} & \cdots & \alpha_{nj} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{1n} & \alpha_{2n} & \cdots & \alpha_{in} & \cdots & \alpha_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v''_{s1} \\ v''_{s2} \\ \vdots \\ v''_{si} \\ \vdots \\ v''_{sn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v'_{s1} \\ v'_{s2} \\ \vdots \\ v'_{si} \\ \vdots \\ v'_{sn} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

由上述方程解得:

$$\begin{pmatrix} v''_{s1} \\ v''_{s2} \\ \vdots \\ v''_{si} \\ \vdots \\ v''_{sn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\det A_1}{\det A} \\ \frac{\det A_2}{\det A} \\ \vdots \\ \frac{\det A_i}{\det A} \\ \vdots \\ \frac{\det A_n}{\det A} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

其中, $\det A$ 为矩阵 A 所对应的行列式, $\det A_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为以 $v'_{si} (i=1, 2, \dots, n)$ 替换 A 中第 i 列各矩阵元后得到的 n 阶行列式。利用式(10), 得:

$$\begin{pmatrix} \eta_{\mathcal{R}_1} \\ \eta_{\mathcal{R}_2} \\ \vdots \\ \eta_{\mathcal{R}_i} \\ \vdots \\ \eta_{\mathcal{R}_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_{R_1} v'_{s1}/v''_{s1} \\ \eta_{R_2} v'_{s2}/v''_{s2} \\ \vdots \\ \eta_{R_i} v'_{si}/v''_{si} \\ \vdots \\ \eta_{R_n} v'_{sn}/v''_{sn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_{R_1} \frac{\det A}{\det A_1} v'_{s1} \\ \eta_{R_2} \frac{\det A}{\det A_2} v'_{s2} \\ \vdots \\ \eta_{R_i} \frac{\det A}{\det A_i} v'_{si} \\ \vdots \\ \eta_{R_n} \frac{\det A}{\det A_n} v'_{sn} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

其中, v'_s/v'_s 大于 1, 而 η_R 小于 1, 所以串音器件的 η_s 可能大于 1, 也可能小于 1。也就是说串音可能使器件响应率提高, 也可能使其下降。对于无串音器件, $\eta_s=1$, 它的实测响应率才是真实的。

3. 对探测率的影响

探测率 $D^* = \frac{v_s/v_N}{P} \sqrt{A_d \Delta f}$, 式中, v_N 为探测元的噪声电压, A_d 为探测元的面积, Δf 为带宽。同样, 我们引入探测率变化因子 η_{D^*} :

$$\eta_{D^*} \equiv D^*/D^*, \quad (14)$$

其中, D^* 为串音器件某一探测元的实测探测率, D^* 为无串音器件相应探测元的探测率。可将式(14)写成如下形式:

$$\eta_{D^*} = \frac{v'_s}{v_s} \cdot \frac{v_N}{v'_N} = \frac{v'_s}{v_s} \cdot \frac{v''_N}{v'_N}, \quad (15)$$

其中, v'_N 、 v_N 分别为与 D^* 、 D^* 对应的噪声电压, v''_N 为串音器件某一探测元的噪声电流在该端产生的噪声电压, 它与 v'_N 满足如下的线性代数方程组(这里假设串音器件所有探测元的噪声电压是完全不相关的):

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11}^2 & \alpha_{21}^2 & \cdots & \alpha_{i1}^2 & \cdots & \alpha_{n1}^2 \\ \alpha_{12}^2 & \alpha_{22}^2 & \cdots & \alpha_{i2}^2 & \cdots & \alpha_{n2}^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{1j}^2 & \alpha_{2j}^2 & \cdots & \alpha_{ij}^2 & \cdots & \alpha_{nj}^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{1n}^2 & \alpha_{2n}^2 & \cdots & \alpha_{in}^2 & \cdots & \alpha_{nn}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v''_{N_1} \\ v''_{N_2} \\ \vdots \\ v''_{N_i} \\ \vdots \\ v''_{N_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v'_{N_1} \\ v'_{N_2} \\ \vdots \\ v'_{N_i} \\ \vdots \\ v'_{N_n} \end{pmatrix} \quad (16)$$

其解为:

$$\begin{pmatrix} v''_{N_1} \\ v''_{N_2} \\ \vdots \\ v''_{N_i} \\ \vdots \\ v''_{N_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\det A_1^2}{\det A^2} \right)^{1/2} \\ \left(\frac{\det A_2^2}{\det A^2} \right)^{1/2} \\ \vdots \\ \left(\frac{\det A_i^2}{\det A^2} \right)^{1/2} \\ \vdots \\ \left(\frac{\det A_n^2}{\det A^2} \right)^{1/2} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

其中, $\det A^2$ 表示式(16)中的方阵的行列式, $\det A_i^2 (i=1, 2, \dots, n)$ 为 v''_{N_i} 以 $(i=1, 2, \dots, n)$ 替换 A^2 中第 i 列各矩阵元后得到的 n 阶行列式。从式(17)、式(15)、式(12)得:

$$\begin{pmatrix} \eta_{D_1^*} \\ \eta_{D_2^*} \\ \vdots \\ \eta_{D_i^*} \\ \vdots \\ \eta_{D_n^*} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v'_{s_1}}{v''_{s_1}} \frac{v''_{N_1}}{v'_{N_1}} \\ \frac{v'_{s_2}}{v''_{s_2}} \frac{v''_{N_2}}{v'_{N_2}} \\ \vdots \\ \frac{v'_{s_i}}{v''_{s_i}} \frac{v''_{N_i}}{v'_{N_i}} \\ \vdots \\ \frac{v'_{s_n}}{v''_{s_n}} \frac{v''_{N_n}}{v'_{N_n}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v'_{s_1}}{v'_{N_1}} \frac{\det A}{\det A_1} \left(\frac{\det A_1^2}{\det A^2} \right)^{1/2} \\ \frac{v'_{s_2}}{v'_{N_2}} \frac{\det A}{\det A_2} \left(\frac{\det A_2^2}{\det A^2} \right)^{1/2} \\ \vdots \\ \frac{v'_{s_i}}{v'_{N_i}} \frac{\det A}{\det A_i} \left(\frac{\det A_i^2}{\det A^2} \right)^{1/2} \\ \vdots \\ \frac{v'_{s_n}}{v'_{N_n}} \frac{\det A}{\det A_n} \left(\frac{\det A_n^2}{\det A^2} \right)^{1/2} \end{pmatrix} \quad (18)$$

其中, v'_s/v'_s 大于 1, v'_N/v'_N 小于 1。但是, 由行列式可知, 信号是各项之和, 而噪声是各项平方和之平方根。因此, 串音器件的探测率变化因子仍大于 1, 即串音使器件探测率变大。

五、结 论

1. 串音使 InSb 探测器列阵各探测元的实测结电阻变小。
2. 串音可能使 InSb 探测器列阵各探测元的实测响应率变大, 也可能使它们变小。
3. 串音使 InSb 探测器列阵各探测元的实测探测率变大。

我们的结果虽然是从 InSb 探测器列阵中获得的, 但是, 分析的方法适用于类似的探测器列阵。

致谢——赵文琴等同志对本工作给以很大的支持与帮助, 在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 赵文琴, 半导体学报, 2(1981), 1, 14~21.
- [2] H. T. 马克西莫维奇著, 林海明译, 线性电路及其变换, 上海科学技术出版社, 1961, 49.

THE EFFECT OF CROSSTALK ON PERFORMANCES OF InSb PHOTOVOLTAIC INFRARED DETECTOR LINEAR ARRAY

WANG XINDE, HU WENJUN, SHEN SHOUZHENG
(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

By reducing an InSb photovoltaic infrared detector linear array to a linear resistance network, the effects of crosstalk on the resistance of the $p-n$ junction as well as on the responsivity and the detectivity for every detecting element in the array are discussed. The results indicate that when there is a crosstalk, for the resistance of the $p-n$ junction, the practically measured value will be smaller than the true one, for the detectivity, it will be larger, and for the responsivity, it can be smaller or larger.