

压敏电阻体中电流分布特点

Current distribution characteristics in varistor

张俊峰, 张强, 杜静

陕西华星电子集团有限公司 咸阳 712099

摘要: 针对电流在压敏电阻体微观结构中的分布进行试验研究。对压敏电阻器芯片施以冲击电流, 会在垂直方向上引起压敏参数发生变化且变化小于冲击方向, 压敏电压呈对称变化, 漏电流增加、非线性指数下降。通过分析讨论指出, 在压敏电阻器芯片的一个方向上施加电压时, 电压同方向有电流流过且电阻体电极面上各点流入的电流密度不同, 垂直电压方向也有电流流过, 流过的水平电流和垂直电流随电阻体均匀与否表面出相同的均匀性。

关键词: 电流分布, 特点, 垂直电流

1 引言

已经知道, 压敏电阻器的微观结构, 是由富铋相包裹的氧化锌晶粒构成的三维互联立体结构^[1], 导电网络是众多的晶界串联、并联和桥联形成的混联电路, 再加上压敏电阻体本身存在结构不均匀, 使得压敏电阻器导电时电流在微观结构网络中的分布变得很复杂。但压敏电阻器中电流的分布特点到底是什么样的? 鲜见研究与报道。

本文就针对压敏电阻器的微观导电网络中电流的分布问题展开研究, 希望揭示压敏电阻器微观结构中的导电电流分布特点, 以用电流的分布来分析解释压敏电阻器性能与可靠性, 为解决生产研制过程提供参考。

2 试验

设计针对压敏电阻器芯片正交方向导电性能试验。

芯片设计为 34mm×34mm×6mm, 低压瓷料, 定义 34mm×34mm 的面为上下截面, 34mm×6mm 的面为侧面, 银电极 5mm×4mm 设计在侧面中心, 这种设计保证了正对电极的直线距离最短且导电不受另外两个正交方向的电极的影响, 具体设计如图 1, 曲线路径长度为直

线路径长度的 1.2 倍以上。定义正交电极对分别为 12 和 34, 冲击电流通过 12 电极对。

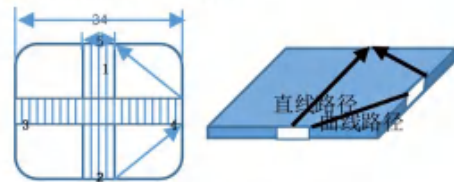


图 1 正交电极芯片设计

按图 1 制作试验芯片, 在 12 电极上焊接引线, 用硅树脂对芯片进行表面绝缘处理, 在 12 电极间施加 8/20μs 波形的电流冲击, 监测 34 电极的压敏特性变化, 用以确定 34 电极间的晶界电流分布情况。

3 结果与分析讨论

3.1 试验结果

取正交芯片, 在正交芯片的 12 电极连续施加 8/20μs 脉冲电流冲击, 同时监测 12 电极间和 34 电极间压敏三参数的变化情况, 试验结果分别列于表 1 至表 7。

表 1 50A 电流冲击下 12 电极间的压敏特性变化

50A 次数	正向				反向				50A 次数	正向				反向			
	V1 V	ΔV/% %	IL μA	α	V1 V	ΔV/% %	IL μA	α		V1 V	ΔV/% %	IL μA	α	V1 V	ΔV/% %	IL μA	α
初始	1605		1	46													
1	1613	0.5	1.1	45	1595	-0.6	1.7	38	22	1634	1.8	1.24	43	1602	-0.2	2.36	35
2	1616	0.7	1.1	45	1598	-0.4	1.7	39	23	1634	1.8	1.23	42	1604	-0.1	2.42	35
3	1618	0.8	1.1	45	1597	-0.5	1.8	39	24	1634	1.8	1.29	42	1604	-0.1	2.52	34
4	1620	0.9	0.9	44	1599	-0.4	1.9	38	25	1634	1.8	1.25	42	1604	-0.1	2.52	34
5	1620	0.9	1.2	43	1599	-0.4	1.9	39	26	1635	1.9	1.27	42.6	1604	-0.1	2.59	34
6	1621	1.0	1.3	44	1600	-0.3	2.1	37	27	1634	1.8	1.26	42.4	1604	-0.1	2.63	34
7	1623	1.1	1.3	43	1600	-0.3	1.9	37	28	1635	1.9	1.28	42.3	1604	-0.1	2.6	34

(接表 1)

50A	正向				反向				50A	正向				反向			
次数	V1	Δ V%	IL	α	V1	Δ V%	IL	α	次数	V1	Δ V%	IL	α	V1	Δ V%	IL	α
	V	%	μA		V	%	μA			V	%	μA		V	%	μA	
初始	1605		1	46													
8	1624	1.2	1.3	43	1600	-0.3	2.3	36	29	1636	1.9	1.28	42.9	1604	-0.1	2.67	34
9	1627	1.4	1.3	43	1601	-0.2	2.2	36	30	1636	1.9	1.28	42.2	1604	-0.1	2.63	34
10	1627	1.4	1.3	43	1599	-0.4	2.2	36	31	1636	1.9	1.26	42.2	1605	0.0	2.67	34
11	1626	1.3	1.3	44	1602	-0.2	2.3	36	32	1636	1.9	1.28	42	1605	0.0	2.54	34
12	1629	1.5	1.3	41	1602	-0.2	2.2	36	33	1636	1.9	1.23	43	1604	-0.1	2.59	34
13	1627	1.4	1.23	43	1601	-0.2	2.2	36	34	1637	2.0	1.27	41.9	1607	0.1	2.71	33
14	1628	1.4	1.2	43	1602	-0.2	2.3	35	35	1638	2.1	1.28	41.9	1605	0.0	2.67	34
15	1629	1.5	1.25	43	1602	-0.2	2.36	35	36	1638	2.1	1.23	42.2	1606	0.1	2.57	33
16	1631	1.6	1.25	42	1603	-0.1	2.4	36	37	1638	2.1	1.27	42	1607	0.1	2.6	33
17	1631	1.6	1.27	44.2	1603	-0.1	2.42	34.9	38	1639	2.1	1.28	42	1606	0.1	2.82	33
18	1630	1.6	1.26	43	1604	-0.1	2.21	36.3	39	1639	2.1	1.27	42	1606	0.1	2.8	33
19	1631	1.6	1.28	43	1602	-0.2	2.36	35	40	1639	2.1	1.3	42	1606	0.1	2.8	33
20	1633	1.7	1.26	43	1599	-0.4	2.2	36	41	1639	2.1	1.26	42.3	1606	0.1	2.84	33
21	1633	1.7	1.24	43	1603	-0.1	2.5	34.8	42	1641	2.2	1.3	41.7	1606	0.1	2.68	33

表 2 100A 电流冲击下 12 电极间的压敏特性变化

100A	正向				反向			
冲击次数	V1	Δ V%	IL	α	V1	Δ V%	IL	α
	V	%	μA		%	%	μA	
初始	1605		1.1	45	1605		1.1	45
1	1599	-0.4	2.9	33	1619	0.9	1.5	43
2	1600	-0.3	3.1	31.4	1623	1.1	1.5	42
3	1600	-0.3	3.72	30.6	1626	1.3	1.67	44
4	1600	-0.3	3.83	30.3	1628	1.4	1.71	41
5	1602	-0.2	3.38	31.9	1628	1.4	1.7	42
6	1603	-0.1	2.95	33.7	1630	1.6	1.71	42
7	1603	-0.1	3.05	33.5	1629	1.5	1.44	41.1
8	1601	-0.2	4.05	30	1631	1.6	1.66	40
9	1601	-0.2	3.9	29.4	1632	1.7	2	39.5
10	1600	-0.3	4.5	28.5	1633	1.7	2	39.2

表 3 单次冲击和 10 次冲击不同电流试验结果

电极	12				21		
	Δ V%	α	IL	Δ V%	α	IL	
电流	%		μA	%		μA	
A							
1 次	0		46		46	1	
	50	0.5	45	1.1	38	1.7	
	100	0.9	43	1.1	33	2.9	
	120	1.31	41	5	30	15	
	296	-0.12	30	5.4	20	11.5	
	450	0.56	31	4.5	17	18	
10 次	0		46		46	1	
	50	1.4	43	1.3	36	2.2	
	100	1.7	39	2	29	4.5	
	450	1.43	24	6.4	13	35	

表 4 1# 芯片试验结果

电极	12				21			
累加	V1	$\Delta V\%$	IL	α	V1	$\Delta V\%$	IL	α
电流	V	%	μA		V	%	μA	
初值	1618		0.9	45	1620		3.5	45
458	1615	0.56	4.3	30	1565	-3.34	13	18
444	1622	1	4.5	29	1551	-4.2	21.7	15
485	1624	1.12	4.9	28	1543	-4.69	25.1	15
472	1625	1.18	5.1	27	1536	-5.13	35.9	15
458	1626	1.25	5.1	27	1533	-5.31	26.7	14
485*5	1628	1.37	6.2	24	1513	-6.55	33	13
485*6	1630	1.49	7	23	1498	-7.47	38.5	12

电极	43				34			
时机	V1	$\Delta V\%$	IL	α	V1	$\Delta V\%$	IL	α
	V	%	μA		V	%	μA	
初值	1618		0.9	45	1620		3.5	45
终值	1617	-0.06	20	32	1617	-0.19	-	27
等效终值	1612	-0.40		12	1601	-1.19		7.8

表 5 2# 芯片试验结果

电极	12				21			
累加	V1	$\Delta V\%$	IL	α	V1	$\Delta V\%$	IL	α
电流	V	%	μA		V	%	μA	
初值	1652		1.4	44	1631		1.5	43
296	1650	-0.12	5.4	30	1598	-2.02	11.5	20
364	1651	-0.06	7.3	27	1584	-2.88	17.9	17
431	1646	-0.36	12	20	1564	-4.11	27.9	14
431	1656	0.24	17.7	18	1558	-4.48	29.5	14
1158	1640	-0.73	21.5	17	1542	-5.46	39.7	12

电极	43				34			
时机	V1	$\Delta V\%$	IL	α	V1	$\Delta V\%$	IL	α
	V	%	μA		V	%	μA	
初值	1635		2.1	37	1645		1.6	45
终值	1633	-0.12	8	34	1641	-0.24	5.1	43
等效终值	1622	-0.78		23	1619	-1.56		35

表 6 3# 芯片试验结果

电极	12				21			
累加	V1	$\Delta V\%$	IL	α	V1	$\Delta V\%$	IL	α
电流	V	%	μA		V	%	μA	
初值	1624		0.1	46	1626		0.9	46
445	1633	0.55	4.5	31	1563	-3.87	18.5	17
455	1635	0.68	4.3	33	1560	-4.06	20	16
471	1636	0.74	5.2	27	1550	-4.67	23.4	15
472	1634	0.62	5.5	26	1546	-4.92	25.6	15
458	1645	1.29	2.1	26	1556	-4.31	21.3	15
472	1635	0.68	3.5	25	1539	-5.35	27.1	14
472*10	1644	1.23	7.8	22	1519	-6.58	32.8	13
472	1641	1.05	8.1	21	1509	-7.2	34	13

(接表 6)

电极	12				21			
累加	V1	$\Delta V\%$	IL	α	V1	$\Delta V\%$	IL	α
电流	V	%	μA		V	%	μA	
485*5	1637	0.8	9.4	21	1497	-7.93	40	12
485	1636	0.74	9.5	21	1497	-7.93	40.3	12
电极	43				34			
时机	V1	$\Delta V\%$	IL	α	V1	$\Delta V\%$	IL	α
	V	%	μA		V	%	μA	
初值	1629		1.2	45	1628		1.13	43
终值	1629	0.00	8.4	38	1627	-0.06	9	36
等效终值	1629	0.00		20	1622	-0.39		19

表 7 4# 芯片试验结果

电极	12				21			
累加	V1	$\Delta V\%$	IL	α	V1	$\Delta V\%$	IL	α
电流	V	%	μA		V	%	μA	
初值	1624		1.1	46	1637		1.2	46
472*5	1649	1.54	5.1	30	1555	-5.01	15	17
485*5	1645	1.29	6.2	27	1516	-7.39	33.8	13
485*4	1654	1.85	2.4	32	1528	-6.66	31.6	14
485*2	1635	0.68	7	26	1491	-8.92	37	16
1280	1640	0.99	9.9	26	1494	-8.74	38.7	12
电极	43				34			
时机	V1	$\Delta V\%$	IL	α	V1	$\Delta V\%$	IL	α
	V	%	μA		V	%	μA	
初值	1614		1	45	1614		1	46
终值	1613	-0.06	9	39	1614	0.00	9	36
等效终值	1608	-0.40		22	1614	0.00		16

3.2 正交芯片中冲击电流施加方向和垂直方向的电流的分布是不同的

从表中结果可以看出：对压敏电阻器正交芯片施以冲击电流，会在在施加电流同方向和垂直方向上均引起压敏参数发生变化。

a) 电流施加方向压敏三参数呈不对称变化，在试验电流小于 1250A 的情况下，正向电压敏电压上升，反向压敏电压下降；两个方向非线性指数都下降，正向下降少，反向下降多；两个方向漏电流均上升，正面上升小，反面下降多。

b) 垂直电流施加方向压敏三参数的变化几乎是对称的，两个方向压敏电压变化很小且远小于电流施加方向的情形，垂直方向几乎不变，施加方向变化明显；非线性指数下降，下降后介于电流施加方向试验后正反面的非线性

之间；漏电流下降。

c) 从冲击后正交芯片压敏三参数的变化来比较，垂直方向相当于小于 200A 的电流冲击的结果。

冲击电流施加时，正交芯片中电流施加方向和垂直方向的压敏三参数的变化明显反应出，冲击电流在芯片中沿电流施加方向和垂直方向的分布明显不同。

3.3 正交芯片中冲击电流施加方向和垂直方向的电流的分布定性分析

如图 2 所示压敏电阻芯片中的晶粒二维构型，分为 a) 均匀和 b) 不均匀状态，图中列出两串相邻晶链，分别称为晶链 A 和晶链 B，以两个晶链为主电流通道计算通电状态时两链的电流比值列于表 10 中，并以此计算由 A 链到 B 链和由 B 链到 A 链的垂直方向电流的相邻两晶粒间的电位差，计算结果列于表 8 和表 9 中。

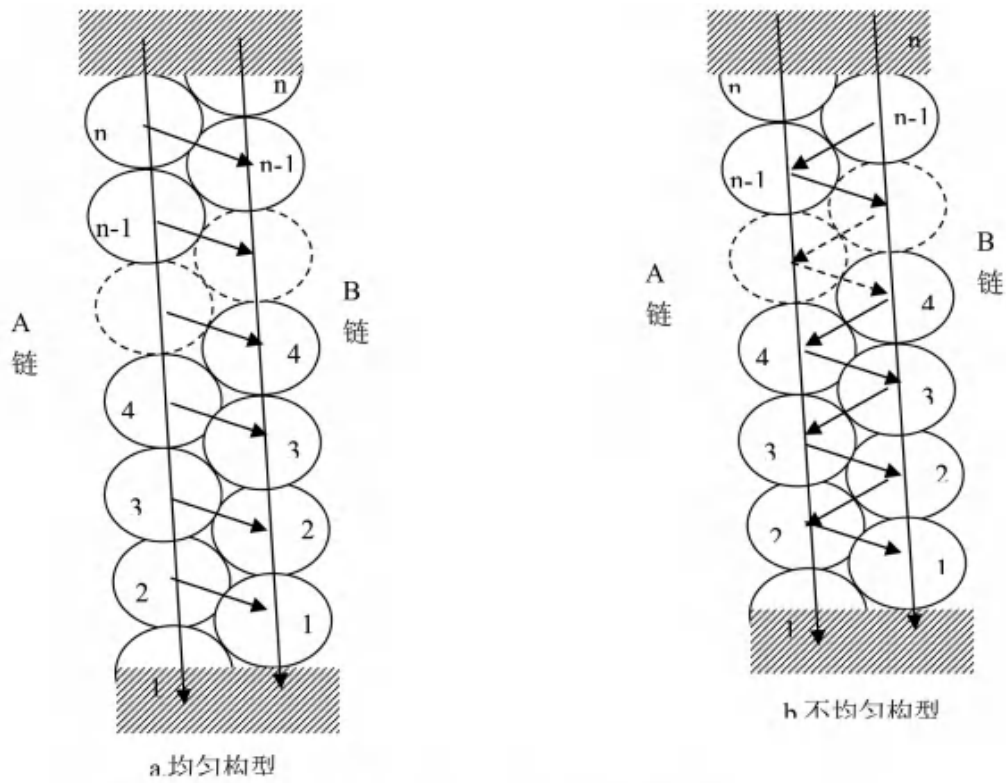


图2 压敏电阻芯片中的晶粒二维简化构型

表8 按图2b计算垂直方向电流的电位差

限压比		1		1.5		2		2.5		3	
A链晶粒数	电流方向	从n-1 至n-2	从n-1 到n-1	从n-1 至n-2	从n-1 到n-1	从n-1 至n-2	从n-1 到n-1	从n-1 至n-2	从n-1 到n-1	从n-1 至n-2	从n-1 到n-1
	n	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}
3	3	0.5	0.5	0.75	0.75	1	1	1.25	1.25	1.5	1.5
	4	0.33	0.67	0.50	1.00	0.67	1.33	0.83	1.67	1	2
5	3	0.67	0.33	1.00	0.50	1.33	0.67	1.67	0.83	2	1
	4	0.25	0.75	0.38	1.13	0.50	1.50	0.63	1.88	0.75	2.25
	5	0.50	0.50	0.75	0.75	1.00	1.00	1.25	1.25	1.50	1.50
9	3	0.75	0.25	1.13	0.38	1.50	0.50	1.88	0.63	2.25	0.75
	9	0.13	0.88	0.19	1.31	0.25	1.75	0.31	2.19	0.38	2.63
	8	0.25	0.75	0.38	1.13	0.50	1.50	0.63	1.88	0.75	2.25
	7	0.38	0.63	0.56	0.94	0.75	1.25	0.94	1.56	1.13	1.88
	6	0.50	0.50	0.75	0.75	1.00	1.00	1.25	1.25	1.50	1.50
	5	0.63	0.38	0.94	0.56	1.25	0.75	1.56	0.94	1.88	1.13
	4	0.75	0.25	1.13	0.38	1.50	0.50	1.88	0.63	2.25	0.75
21	3	0.88	0.13	1.31	0.19	1.75	0.25	2.19	0.31	2.63	0.38
	21	0.05	0.95	0.08	1.43	0.10	1.90	0.13	2.38	0.15	2.85
	20	0.10	0.90	0.15	1.35	0.20	1.80	0.25	2.25	0.30	2.70
	19	0.15	0.85	0.23	1.28	0.30	1.70	0.38	2.13	0.45	2.55
	18	0.20	0.80	0.30	1.20	0.40	1.60	0.50	2.00	0.60	2.40
	17	0.25	0.75	0.38	1.13	0.50	1.50	0.63	1.88	0.75	2.25
	16	0.30	0.70	0.45	1.05	0.60	1.40	0.75	1.75	0.90	2.10
15	0.35	0.65	0.53	0.98	0.70	1.30	0.88	1.63	1.05	1.95	

(接表 8)

限压比		1		1.5		2		2.5		3	
A 链晶粒数	电流方向	从 n-1 至 n-2	从 n-1 到 n-1	从 n-1 至 n-2	从 n-1 到 n-1	从 n-1 至 n-2	从 n-1 到 n-1	从 n-1 至 n-2	从 n-1 到 n-1	从 n-1 至 n-2	从 n-1 到 n-1
	n	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}
21	14	0.40	0.60	0.60	0.90	0.80	1.20	1.00	1.50	1.20	1.80
	13	0.45	0.55	0.68	0.82	0.90	1.10	1.13	1.38	1.35	1.65
	12	0.50	0.50	0.75	0.75	1.00	1.00	1.25	1.25	1.50	1.50
	11	0.55	0.45	0.83	0.67	1.10	0.90	1.38	1.13	1.65	1.35
	10	0.60	0.40	0.90	0.60	1.20	0.80	1.50	1.00	1.80	1.20
	9	0.65	0.35	0.98	0.53	1.30	0.70	1.63	0.88	1.95	1.05
	8	0.70	0.30	1.05	0.45	1.40	0.60	1.75	0.75	2.10	0.90
	7	0.75	0.25	1.13	0.38	1.50	0.50	1.88	0.62	2.25	0.75
	6	0.80	0.20	1.20	0.30	1.60	0.40	2.00	0.50	2.40	0.60
	5	0.85	0.15	1.28	0.23	1.70	0.30	2.13	0.38	2.55	0.45
	4	0.90	0.10	1.35	0.15	1.80	0.20	2.25	0.25	2.70	0.30
3	0.95	0.05	1.43	0.07	1.90	0.10	2.38	0.13	2.85	0.15	

表 9 按图 2a 计算垂直方向电流的电位差

限压比		1		1.5		2		2.5		3	
A 链晶粒数	电流方向	从 n-1 至 n-2	从 n-1 到 n-1	从 n-1 至 n-2	从 n-1 到 n-1	从 n-1 至 n-2	从 n-1 到 n-1	从 n-1 至 n-2	从 n-1 到 n-1	从 n-1 至 n-2	从 n-1 到 n-1
	n	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}
3	3	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
4	4	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	3	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
5	5	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	4	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	3	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
9	9	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	8	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	7	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	6	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	5	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	4	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	3	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
21	21	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	20	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	19	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	18	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	17	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	16	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	15	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	14	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	13	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	12	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	11	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
10	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0	
9	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0	
8	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0	
7	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0	

(接表9)

限压比		1		1.5		2		2.5		3	
A链晶粒数	电流方向	从n-1 至n-2	从n-1 到n-1	从n-1 至n-2	从n-1 到n-1	从n-1 至n-2	从n-1 到n-1	从n-1 至n-2	从n-1 到n-1	从n-1 至n-2	从n-1 到n-1
	n	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}	I_{AB}	I_{BA}
21	6	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	5	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	4	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0
	3	1	0	1.5	0	2	0	2.5	0	3	0

表10 水平电流的均匀分布

		晶界数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
不均匀 构型	I_n/I_{n+1}	32	7.6	4.2	3.0	2.5	2.2	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	
	晶界数	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
	I_n/I_{n+1}	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2
均匀构型		两链上的水平电流相等											

由表中的定性计算结果可知，晶粒不均匀的情形和晶粒均匀的情形是不同的。

1) 当晶粒均匀分布时，垂直方向上的A到B链的电压与电流施加方向上的电压接近，A到B链垂直方向上的电流与水平方向上的电流接近且均匀分布，扩展到三维结构，垂直方向的电流方向是随机的，可在两个方向上变化，另有一半垂直方向的晶界没有电流流过。

2) 当晶粒分布不均匀时，从A流向B链的电流和从B流向A链的垂直电流不均匀分布，只有接近电极处的垂直电流大，芯片中间的垂直电流比施加电流小很多。扩展到三维的情况，芯片电集近端的垂直电流方向随机可再两个方向。

3) 水平方向的电流分布：两条主连上的水平电流当晶粒均匀时两链电流相同，扩展到立体结构，所有链上的电流均相同；晶粒不均时，电流分布不均匀，链长电流小，当不均匀程度达5%时，电流不均匀性在1.2倍，可以视为同均匀。

4) 测量压敏电压和限制电压时，电流数十安，不均匀晶粒分布时垂直电流小于1mA，冲击试验时，垂直电流百安培级别。

3.4 正交芯片中垂直冲击电流施加方向压敏三参数变化的解释

由上面定性计算分析的结果，晶粒不尽均匀是常态，所以流过芯片中央的垂直电流比水平电流小很多且方向随机，而试验中垂直方向测量的通道就是水平电流中段的部

分，显然小的电流加上正反向都有，垂直方向的压敏三参数变化小且呈对称变化，就象结果中估计的，虽然水平电流到了1250A，但垂直方向的电流却上小于200A的，

试验结果和定性分析相互印证，说明定性分析的结果是可信的。

4 结论

- 1) 压敏电阻体中，晶粒理想化均匀是不存在的；
- 2) 晶粒分布不均匀时，水平电流不均匀分布，不均匀性小于5%时，冲击时的电流分布接近均匀；
- 3) 在压敏电阻器的正对电极上施加电流，垂直方向的晶界也会有电流流过且方向随机，靠近电极处垂直电流大，水平电流中段垂直电流小；
- 4) 测量压敏电压和限制电压时，垂直电流小于1mA，冲击时，冲击电流时垂直电流在百安培级别；
- 5) 冲击电流作用时，垂直方向的压敏三参数变化小于水平方向且呈对称变化。

参考文献

- 1 吴维韩，何金良，高玉明等. 金属氧化物非线性电阻特性和应用. 北京：清华大学出版社，1998.