

计量型扫描探针法栅格间距校准规范

编制说明

一、任务来源

依据市场监管总局办公厅关于下达《2021 年国家计量技术规范制定、修订及宣贯计划》的通知（市监计量发【2021】50 号），受全国几何量长度计量技术委员会委托，由中国计量科学研究院负责制定《计量型扫描探针法栅格间距校准规范》。

栅格间距样板主要用于扫描探针显微镜（AFM、STM）、台阶仪、触针式轮廓仪和光学式表面形貌测量仪等纳米测量仪器的横向位移量的校准，也可用于电子显微镜等纳米测量仪器的水平放大倍数校准。其溯源链从国家最高纳米几何结构标准装置—微纳米栅格间隔标准样板—微纳米几何量工作计量器具以此传递。栅格间距样板量值的准确性对其校准的生产检测仪器十分重要，而其校准的规范化则为标准样板的量值统一提供必要的技术支持。

栅格间距作为纳米标准物质（纳米粒度、纳米粗糙度、纳米栅格间距、纳米光栅结构，薄膜厚度）之一，以及国际计量技术委员会长度咨询委员会提出的五大纳米长度量（线宽（Nano1）、线间隔（Nano2）、线纹尺（Nano3）、一维纳米光栅（Nano4）和二维纳米光栅（Nano5））中的一项，栅格间距在纳米计量发展中具有重要的地位和作用。

目前国内尚无已发布的全国性的微纳米线间隔标准样板的校准规程，计量机构通常依据 GB/T 19067.1-2003/ISO 5436-1:2000《产品几何量技术规范(GPS)表面结构轮廓法测量标准 第 1 部分：实物测量标准》、B/T 19067.2-2004/ISO 5436-2:2000《产品几何量技术规范(GPS)表面结构 轮廓法 测量标准 第 2 部分：软件测量标准》、GB/T10610-2009《产品几何量技术规范(GPS)表面结构 轮廓法 评定表面结构》等国家标准以及 JJF1059-2012《测量不确定度评定与表示的规则和方法》等。国外而言，多以 ISO5436-1:2000 产品几何量技术规范(GPS)表面结构轮廓法测量标准》为参考进行校准。现有的国家标准或检定规程不能为栅格间距样板的校准技术和方法提供明确的依据。然而，栅格间距样板的应用已随着纳

米技术及其相关集成电路行业的发展而日益广泛，针对该类标准样板制定相关的校准规范能够考虑到微纳米栅格间距样板在校准方法、校准装置、不确定度分析上纳米尺度的独特性，将对集成电路行业等今后的发展与实践产生积极的影响。

二、栅格间距标准样板的基本情况

目前，微纳米线间隔标准样板的生产制造厂商以国外的居多，例如：美国 VLSI 标准公司，其中 VLSI 代工的微纳米栅格间隔标准样板提供给多家微纳米测量仪器厂商（布鲁克仪器公司）。随着国外仪器的引进国外的栅格间隔标准样板一同被国内行业使用，得到广泛的市场。

随着国内半导体微电子产业的迅速发展，不少相关科研机构也开展了微纳米栅格间距标准样板的研究与制备。中国计量科学研究院与中科院物理所联合研制 400nm 一维栅格间距标准物质、与同济大学联合研制 100nm 栅格间距标准物质。作为扫描探针显微镜（SPM）、原子力显微镜（AFM）、台阶仪、轮廓仪等纳米测量仪器横向位移量的校准标准物质，微纳米栅格间隔标准样板常常作为该类仪器的重要附件出售，并被广泛使用。随着微纳米产业规模的不断发展以及微纳米产业规范化标准化的完善，标准样板也被独立生产和出售。上述微纳米测量仪器在集成电路半导体产业被广泛使用，无论是进口的仪器还是国产的仪器，其通常都有配合使用的微纳栅格间距标准样板。按行业相关规定与品控需要，这些检测仪器需要定期使用配套的标准样板对其进行校准，而所使用的标准样板则需要定期由法定计量机构进行校准，以实现量值溯源。

三、制定规范主要的参考资料和依据

制定本规范的主要参考资料主要有：

JJF 1001-2011 《通用计量术语及定义》

JJF1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》

JJF 1094-2002 《测量仪器特性评定》

进行不确定度评定的主要技术依据有：

JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》

四、规程的主要内容

本规程为了使计量型扫描探针法栅格间距校准规范对社会出具准确、可靠、有效的数据，满足各行业领域的检测、校准需求并对栅格间距标准样板的计量性

能进行较为全面的评价，规程起草小组对栅格间距的技术指标进行统一、合理、符合实际的规定。校准项目主要有以下几项：①平均栅格间距、②栅格均匀性、③二维栅格间距的正交角度等主要计量特性方法和各项指标的要求、校准结果的评定等做了统一的规定，同时对校准条件、校准用仪器设备等也做了统一的要求。

4.1 平均栅格间距

根据校准规范（征求意见稿）中的方法规定，选择样板有效测量区域内均布的 10 个不同位置分别进行测量，在每个位置重复测量 6 次。取每个测位 6 次及以上实测值的平均值作为该测位的测量结果，取 10 个测位的测量结果的平均值作为栅格样板栅格间距的测量结果。

表 2 1 μm 平均栅格间距 (单位: μm)

样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品六	样品七	样品八	样品九	样品十
1	9.078	16.000	12.020	8.044	10.010	16.065	8.035	7.025	9.040	9.042
2	9.038	16.040	12.020	8.044	10.030	16.065	8.015	7.035	9.040	9.038
3	9.038	16.020	12.040	8.044	10.040	16.065	8.045	7.010	9.040	9.040
4	9.060	16.000	12.040	8.001	10.010	16.065	8.055	7.035	9.040	9.040
5	9.060	16.020	12.040	8.001	10.010	16.065	8.035	7.035	9.010	9.015
6	9.038	16.040	12.060	8.001	10.030	16.065	8.035	7.010	9.010	9.015
7	9.048	16.020	12.060	8.001	10.030	16.065	8.045	7.025	9.010	9.010
8	9.078	16.000	12.020	8.044	10.010	16.065	8.035	7.025	9.040	9.040
9	9.038	16.040	12.020	8.044	10.030	16.065	8.015	7.035	9.040	9.020
10	9.038	16.020	12.040	8.044	10.040	16.065	8.045	7.010	9.040	9.040
周期数	9	16	12	8	10	16	8	7	9	9
平均 (μm)	1.006	1.001	1.003	1.003	1.002	1.005	1.005	1.004	1.003	1.003
不确定度 U_{95} (μm)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.005	0.003	0.007	0.003	0.003	0.007

表 3 100nm 平均栅格间距 (单位: μm)

样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品六	样品七	样品八	样品九	样品十
1	2.612	2.523	3.511	3.524	1.853	2.216	1.612	2.422	1.615	1.802
2	2.615	2.523	3.505	3.515	1.853	2.223	1.618	2.422	1.613	1.815
3	2.615	2.523	3.511	3.530	1.853	2.223	1.617	2.422	1.615	1.817
4	2.612	2.517	3.511	3.535	1.793	2.214	1.610	2.416	1.616	1.818

5	2.615	2.517	3.511	3.525	1.793	2.216	1.613	2.416	1.611	1.809
6	2.615	2.517	3.505	3.513	1.793	2.223	1.617	2.416	1.611	1.808
7	2.612	2.517	3.505	3.530	1.793	2.223	1.617	2.416	1.613	1.815
8	2.612	2.523	3.511	3.545	1.853	2.216	1.612	2.422	1.612	1.814
9	2.615	2.523	3.505	3.518	1.853	2.223	1.617	2.422	1.615	1.817
10	2.615	2.523	3.511	3.530	1.853	2.223	1.617	2.422	1.617	1.817
周期数	26	25	35	35	18	22	16	24	16	18
平均 (nm)	101.5	100.8	100.3	100.8	101.6	0.102	100.9	100.8	100.9	100.7
不确定度 U_{95} (nm)	2.1	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1

表 4 250nm 平均栅格间距 (单位: μm)

样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品六	样品七	样品八	样品九	样品十
1	2.759	5.029	3.008	2.010	2.001	2.510	3.015	3.017	2.008	2.259
2	2.769	5.024	3.008	2.010	2.001	2.506	3.008	3.019	2.008	2.259
3	2.759	5.029	2.997	2.010	2.003	2.506	3.008	3.017	2.002	2.258
4	2.769	5.029	3.004	2.010	2.001	2.505	3.011	3.019	2.002	2.258
5	2.763	5.028	3.000	2.014	2.003	2.505	3.011	3.017	2.004	2.254
6	2.756	5.024	2.993	2.014	2.003	2.510	3.015	3.019	2.004	2.254
7	2.756	5.024	2.997	2.014	2.001	2.510	3.015	3.017	2.004	2.256
8	2.759	5.029	3.008	2.010	2.001	2.510	3.015	3.017	2.008	2.259
9	2.769	5.024	3.008	2.010	2.001	2.506	3.008	3.019	2.008	2.259
10	2.759	5.029	2.997	2.010	2.003	2.506	3.008	3.017	2.002	2.252
周期数	11	20	12	8	8	10	12	12	8	9

平均栅格间距 (nm)	251.1	251.3	250.2	251.4	250.2	250.7	251.0	251.4	250.6	250.9
不确定度 U_{95} (nm)	2.3	2.3	2.3	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.1

表 5 500nm 平均栅格间距 (单位: μm)

样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品六	样品七	样品八	样品九	样品十
1	7.071	4.515	4.011	3.508	3.000	3.032	3.513	4.002	3.532	4.542
2	7.079	4.515	4.006	3.508	3.020	3.031	3.502	4.002	3.532	4.542
3	7.086	4.523	4.011	3.508	3.000	3.031	3.513	4.016	3.545	4.558
4	7.079	4.523	4.011	3.508	3.030	3.032	3.502	4.002	3.546	4.560
5	7.086	4.523	4.011	3.503	3.002	3.032	3.513	4.016	3.533	4.542
6	7.071	4.509	4.011	3.503	2.999	3.031	3.502	4.010	3.545	4.558
7	7.086	4.509	4.006	3.503	3.000	3.016	3.513	4.016	3.545	4.558
8	7.071	4.515	4.011	3.508	3.002	3.032	3.513	4.010	3.532	4.542
9	7.079	4.515	4.006	3.508	3.021	3.031	3.502	4.002	3.532	4.542
10	7.086	4.523	4.011	3.508	3.000	3.031	3.523	4.002	3.545	4.558
周期数	14	9	8	7	6	6	7	8	7	9
平均 (nm)	504.5	501.6	501.2	500.9	501.9	505.0	501.3	501.0	505.6	505.6
不确定度 U_{95} (nm)	2.2	2.4	2.1	2.2	2.1	2.6	2.1	2.6	2.8	2.8

4.2 栅格间距均匀性

栅格间距均匀性是栅格间距标准样板的一个重要技术重要指标之一。在本规范中选用最常用的实验标准差法评价栅格间距的均匀性，具体过程可参见本规程（征求意见稿）。主要依据栅格量值国际比对结果、日常校准数据及参考国际标准。

表 6 1 μm 测量均匀性数据 (单位: μm)

测量方向	X 方向					Y 方向				
样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五
1	12.048	9.064	11.06	13.09	9.064	12.024	7.019	7.036	8.065	7.015
2	12.024	9.064	11.06	13.12	9.064	12.024	7.042	7.037	8.052	7.042
3	12.048	9.075	11.07	13.13	9.083	12.024	7.054	7.037	8.078	7.064
4	12.024	9.075	11.07	13.16	9.083	12.024	6.984	7.037	8.052	7.015
5	12.048	9.053	11.07	13.13	9.033	12.036	7.019	7.036	8.065	7.042
6	12.024	9.053	11.09	13.12	9.033	12.036	7.019	7.049	8.039	7.064
7	12.036	9.064	11.09	13.12	9.064	12.036	7.042	7.049	8.065	7.042
8	12.048	9.064	11.06	13.09	9.064	12.024	7.019	7.036	8.065	7.015
9	12.024	9.064	11.06	13.12	9.064	12.024	7.042	7.037	8.052	7.042
10	12.048	9.075	11.07	13.13	9.083	12.024	7.054	7.037	8.078	7.064
周期数	12	9	11	13	9	2	7	7	8	7
平均 (μm)	1.003	1.007	1.006	1.009	1.007	1.002	1.004	1.006	1.008	1.006
SD (μm)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.003	0.001	0.001	0.003
RSD	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.1%	0.3%	0.1%	0.2%	0.3%

表 7 5 μm 测量均匀性数据 (单位: μm)

样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品六	样品七
1	60.350	80.420	50.120	30.362	60.300	65.379	80.240

2	60.350	80.520	50.070	30.289	60.350	65.379	80.080
3	60.280	80.520	50.070	30.362	60.200	65.217	80.112
4	60.280	80.520	50.120	30.362	60.150	65.108	80.192
5	60.350	80.520	50.010	30.362	60.150	65.163	80.032
6	60.350	80.330	50.120	30.362	60.350	65.379	80.192
7	60.410	80.420	50.120	30.289	60.250	65.217	80.192
8	60.350	80.420	50.120	30.362	60.350	65.379	80.192
9	60.350	80.520	50.070	30.289	60.350	65.379	80.080
10	60.280	80.520	50.070	30.362	60.150	65.163	80.112
周期数	12	16	10	6	12	13	16
平均 (μm)	5.028	5.029	5.009	5.057	5.022	5.440	5.009
SD (μm)	0.003	0.004	0.004	0.006	0.007	0.009	0.004
RSD	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%	0.1%

表 8 1 μm 测量均匀性数据 (单位: μm)

样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品六	样品七	样品八	样品九	样品十
1	9.078	16.000	12.020	8.044	10.010	16.065	8.035	7.025	9.040	9.042
2	9.038	16.040	12.020	8.044	10.030	16.065	8.015	7.035	9.040	9.038
3	9.038	16.020	12.040	8.044	10.040	16.065	8.045	7.010	9.040	9.040
4	9.060	16.000	12.040	8.001	10.010	16.065	8.055	7.035	9.040	9.040
5	9.060	16.020	12.040	8.001	10.010	16.065	8.035	7.035	9.010	9.015
6	9.038	16.040	12.060	8.001	10.030	16.065	8.035	7.010	9.010	9.015
7	9.048	16.020	12.060	8.001	10.030	16.065	8.045	7.025	9.010	9.010

8	9.078	16.000	12.020	8.044	10.010	16.065	8.035	7.025	9.040	9.040
9	9.038	16.040	12.020	8.044	10.030	16.065	8.015	7.035	9.040	9.020
10	9.038	16.020	12.040	8.044	10.040	16.065	8.045	7.010	9.040	9.040
周期数	9	16	12	8	10	16	8	7	9	9
平均 (μm)	1.006	1.001	1.003	1.003	1.002	1.005	1.005	1.004	1.003	1.003
SD (μm)	0.002	0.001	0.001	0.003	0.001	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002
RSD	0.2%	0.1%	0.2%	0.3%	0.2%	0.0%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%

表9 500nm 测量均匀性数据 (单位: μm)

样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品六	样品七	样品八	样品九	样品十
1	7.071	4.515	4.011	3.508	3.000	3.032	3.513	4.002	3.532	4.542
2	7.079	4.515	4.006	3.508	3.020	3.031	3.502	4.002	3.532	4.542
3	7.086	4.523	4.011	3.508	3.000	3.031	3.513	4.016	3.545	4.558
4	7.079	4.523	4.011	3.508	3.030	3.032	3.502	4.002	3.546	4.560
5	7.086	4.523	4.011	3.503	3.002	3.032	3.513	4.016	3.533	4.542
6	7.071	4.509	4.011	3.503	2.999	3.031	3.502	4.010	3.545	4.558
7	7.086	4.509	4.006	3.503	3.000	3.016	3.513	4.016	3.545	4.558
8	7.071	4.515	4.011	3.508	3.002	3.032	3.513	4.010	3.532	4.542
9	7.079	4.515	4.006	3.508	3.021	3.031	3.502	4.002	3.532	4.542
10	7.086	4.523	4.011	3.508	3.000	3.031	3.523	4.002	3.545	4.558
周期数	14	9	8	7	6	6	7	8	7	9
平均 (nm)	504.5	501.6	501.2	500.9	501.9	505.0	501.3	501.0	505.6	505.6

SD (nm)	0.440	0.596	0.286	0.330	0.246	0.790	0.998	0.770	0.934	0.945
------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

表 10 250nm 测量均匀性数据 (单位: μm)

样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品六	样品七	样品八	样品九	样品十
1	2.759	5.029	3.008	2.010	2.001	2.510	3.015	3.017	2.008	2.259
2	2.769	5.024	3.008	2.010	2.001	2.506	3.008	3.019	2.008	2.259
3	2.759	5.029	2.997	2.010	2.003	2.506	3.008	3.017	2.002	2.258
4	2.769	5.029	3.004	2.010	2.001	2.505	3.011	3.019	2.002	2.258
5	2.763	5.028	3.000	2.014	2.003	2.505	3.011	3.017	2.004	2.254
6	2.756	5.024	2.993	2.014	2.003	2.510	3.015	3.019	2.004	2.254
7	2.756	5.024	2.997	2.014	2.001	2.510	3.015	3.017	2.004	2.256
8	2.759	5.029	3.008	2.010	2.001	2.510	3.015	3.017	2.008	2.259
9	2.769	5.024	3.008	2.010	2.001	2.506	3.008	3.019	2.008	2.259
10	2.759	5.029	2.997	2.010	2.003	2.506	3.008	3.017	2.002	2.252
周期数	11	20	12	8	8	10	12	12	8	9
平均 (nm)	251.1	251.3	250.2	251.4	250.2	250.7	251.0	251.4	250.6	250.9
SD (nm)	0.459	0.119	0.462	0.229	0.122	0.215	0.261	0.082	0.321	0.276

表 11 100nm 测量均匀性数据 (单位: μm)

样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品六	样品七	样品八	样品九	样品十
1	2.612	2.523	3.511	3.524	1.853	2.216	1.612	2.422	1.615	1.802
2	2.615	2.523	3.505	3.515	1.853	2.223	1.618	2.422	1.613	1.815

3	2.615	2.523	3.511	3.530	1.853	2.223	1.617	2.422	1.615	1.817
4	2.612	2.517	3.511	3.535	1.793	2.214	1.610	2.416	1.616	1.818
5	2.615	2.517	3.511	3.525	1.793	2.216	1.613	2.416	1.611	1.809
6	2.615	2.517	3.505	3.513	1.793	2.223	1.617	2.416	1.611	1.808
7	2.612	2.517	3.505	3.530	1.793	2.223	1.617	2.416	1.613	1.815
8	2.612	2.523	3.511	3.545	1.853	2.216	1.612	2.422	1.612	1.814
9	2.615	2.523	3.505	3.518	1.853	2.223	1.617	2.422	1.615	1.817
10	2.615	2.523	3.511	3.530	1.853	2.223	1.617	2.422	1.617	1.817
周期数	26	25	35	35	18	22	16	24	16	18
平均 (nm)	101.5	100.8	100.3	100.8	101.6	0.102	100.9	100.8	100.9	100.7
SD (nm)	0.057	0.118	0.018	0.263	0.164	0.170	0.170	0.107	0.129	0.277

4.3 二维栅格线的正交角度

表 12 1 μm 二维栅格线的正交角度 (单位: $^{\circ}$)

样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品六	样品七	样品八	样品九	样品十
1	90.1	90.0	89.9	90.0	90.3	90.3	89.9	90.2	90.1	90.2
2	90.1	90.2	90.3	90.0	90.5	90.2	90.1	90.5	90.1	90.5
3	90.1	90.2	90.2	90.0	90.5	90.2	90.1	90.3	90.0	90.2
4	90.1	90.0	90.2	90.1	90.1	90.2	90.0	90.3	90.0	90.2
5	90.0	90.1	90.1	90.1	90.0	90.1	90.0	90.2	90.0	90.0
6	90.0	90.1	90.0	90.1	90.0	90.1	90.0	90.0	90.0	90.0
7	90.0	90.1	90.0	90.0	90.0	90.0	89.9	90.0	90.0	90.0
8	90.1	90.2	90.1	90.1	90.0	90.0	90.0	90.2	90.1	90.1
9	90.1	90.2	90.1	90.1	90.2	90.0	90.0	90.1	90.2	89.9
10	90.1	90.2	90.1	90.1	90.5	90.1	90.1	90.1	90.2	89.9
平均 ($^{\circ}$)	90.1	90.1	90.1	90.1	90.2	90.1	90.0	90.2	90.1	90.1

表 13 10 μm 二维栅格线的正交角度 (单位: $^{\circ}$)

样品序号 测量编号	样品一	样品二	样品三	样品四	样品五	样品六	样品七	样品八	样品九	样品十
1	89.9	90.0	90.4	90.0	90.1	89.9	90.0	90.0	90.2	89.9
2	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	89.9	90.3	90.0	90.3
3	89.9	90.1	90.2	89.9	90.3	89.9	89.9	89.9	89.9	89.9
4	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
5	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
6	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.2	90.4	90.0	90.0	90.0

7	90.0	90.1	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
8	89.9	90.0	90.3	89.9	90.2	89.9	89.9	90.2	90.5	89.9
9	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
10	89.9	90.2	90.0	89.9	89.9	90.2	89.9	90.0	89.9	90.2
平均 (°)	90.0	90.0	90.1	90.0	90.1	90.0	90.0	90.0	90.1	90.0

五、总结

在本规程的制定过程中，我们以国内外资料及相关标准、大量实验数据、不同类型的栅格进行测量的量值比对结果为技术依据，本着科学合理、易于操作的原则，并结合全国长度几何计量技术委员会专家意见和建议，制定了计量型扫描探针法栅格间距校准规范。