

各種放電源からの ESD 特性の比較

小村 淳己*, 吉田 孝博^{*1}, 増井 典明*

(2011年9月12日受付; 2011年11月7日受理)

Comparison of ESD Characteristics from Various Discharge Sources

Junki KOMURA, * Takahiro YOSHIDA^{*1} and Noriaki MASUI*

(Received September 12, 2011; Accepted November 7, 2011)

In recent years, electrostatic discharge (ESD) causes serious damages to semiconductor devices and electronic equipments. Therefore, the elucidation of the mechanism of the ESD is required. In actual situation, ESD occurs by many kind of discharge sources. In this paper, we research the ESD characteristics from 5 types of discharge sources. ESD gun (contact and air discharge), charged metal electrode and metallic tool and fingertip are used as the discharge source. The charged potential is varied from ± 1 kV to ± 3 kV. The grounded electrode used is hemisphere and the radius of curvature of the electrode is 5mm or 15mm. From the experimental results, we found followings; (1) Max frequency of discharge current from ESD gun was different between the air discharge and the contact discharge. (2) Discharge rate and charge amount of ESD from charged human body was smaller. (3) The value of all parameters of ESD from fingertip of charged human body was smallest.

1. はじめに

近年、電子機器や半導体デバイスの微細化、集積化により、静電気放電(ESD)による静電気障害が頻発し、問題となっている。その原因の1つとして、帯電した人体からの静電気放電がある。人体からの静電気放電の耐性評価方法として、国際標準規格IEC61000-4-2に準拠した図1のような電流波形をESDガンにより電子機器に印加する方法がある¹⁾。これは、人体を150 pFのコンデンサと見立て、330Ωの抵抗を介した放電により、人体からの放電電流波形を模擬したものであり、充電電圧毎に、表1に示すように、各パラメータの値が決められている。しかし、実際の帯電した人体からの放電は、指先や、人が握った金属ツールからの放電（以後、金属ツール放電と呼ぶ。）等、様々な箇所から放電が起こり、規格とは異なる放電特性が得られる²⁾。そのため、ESD障害への対策を検討するためには、各種放電源からの放電電流波形の詳細な検討が必要である。

これまで本研究室では、人体からの放電、金属間放電およびESDガンからの放電電流波形について、検討してきた。静電気サージがPCBおよびデバイスに印加されたとき、放電

キーワード: ESD, IEC61000-4-2, 放電電流波形, 最高周波数, 放電電荷量

* 東京理科大学工学部電気工学科 (162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3)

Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku 162-8601, Japan

¹ yoshida@ee.kagu.tus.ac.jp

電流のピーク値、立ち上がり峻度および最高周波数（放電電流に含まれる周波数成分）は、PCB上の静電気サージの伝搬

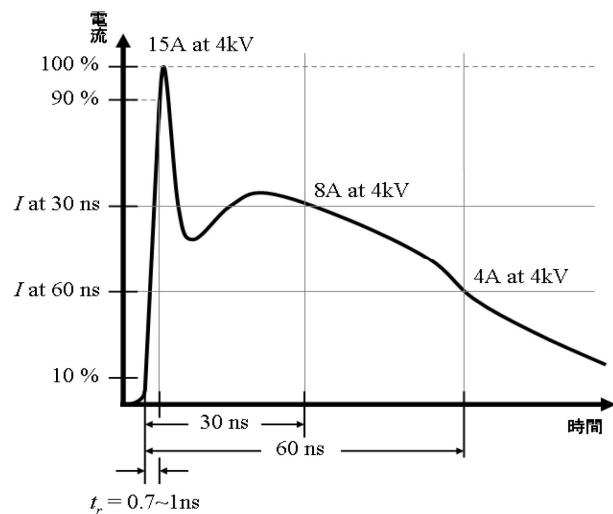


図1 ESDガン(IEC61000-4-2)の放電電流波形

Fig. 1 Waveform of discharge current from ESD gun.
(IEC61000-4-2)

表1 各厳しさレベルにおける各パラメータ

Table 1 Each parameter in each test level.

Test level	Charged potential (kV)	Peak current (A)	Rising speed of 1st peak (ns)	Current at the time of 30 ns (A)
1	2	$7.5 \pm 10\%$	0.7~1.0	$4 \pm 30\%$
2	4	$15 \pm 10\%$	0.7~1.0	$8 \pm 30\%$
3	6	$22.5 \pm 10\%$	0.7~1.0	$12 \pm 30\%$
4	8	$30 \pm 10\%$	0.7~1.0	$16 \pm 30\%$

特性に関係するとともに、放射電磁ノイズの強度に影響を及ぼし、放電電荷量は放電エネルギーに関係し、静電気サージがデバイス内を通過するときに各素子における発熱による障害の原因となると言われている。そこで、本研究では、ESD ガンからの放電（気中放電および接触放電）、金属間放電、金属ツール放電、指先放電の計 5 種類について、静電容量や抵抗値、電極の曲率半径等を各種放電源間で極力近づけた上で、帶電電位を変化させて測定を行い、放電電流波形、放電電流のピーク値、立ち上がり峻度、最高周波数および放電電荷量（初期放電率）の比較・検討を行った。

2. 装置および実験方法

図 2 に各種放電源からの放電についての実験装置の概略を示す。帶電電位は $\pm 1\text{ kV}$, $\pm 2\text{ kV}$, $\pm 3\text{ kV}$ とし、固定された各種放電源に対して、接地金属電極を 0.4 mm/s の速さで近づけ、電流プローブにより検出した電流パルスをトリガ信号として、火花放電発生と同時に、微動台とモータを接続しているクラッチを切り、電極の移動を停止させる。放電源と接地金属電極間で発生する ESD の放電電流波形を電流プローブ（Tektronix CT-1, 帯域 1 GHz）を用いて、オシロスコープ（Tektronix TDS5104B, 帯域 1GHz, サンプル速度 5 GS/s）で観測する。

図 3 に金属間放電における実験装置を示す。金属間放電では、 $5\text{ G}\Omega$ の抵抗を介して、高圧側に 150 pF のコンデンサおよび $330\text{ }\Omega$ の抵抗を挿入し、測定を行った。

図 4 に、指先放電および金属ツール放電の測定装置を示す。指先および人体が握る金属ツールは、テフロン棒で固定する。

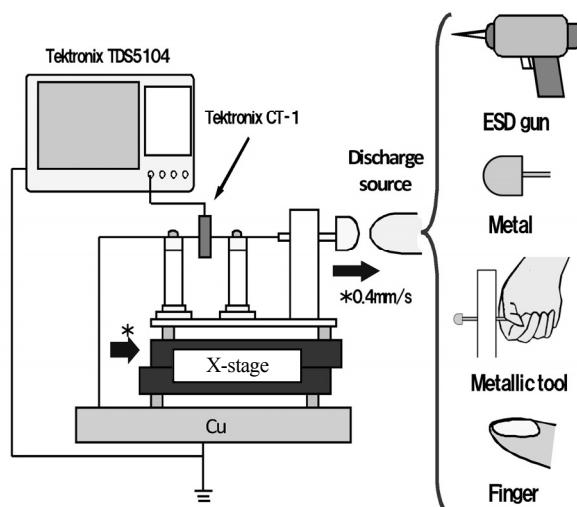


図2 実験装置の概略図

Fig. 2 Schematic view of apparatus for experiment.

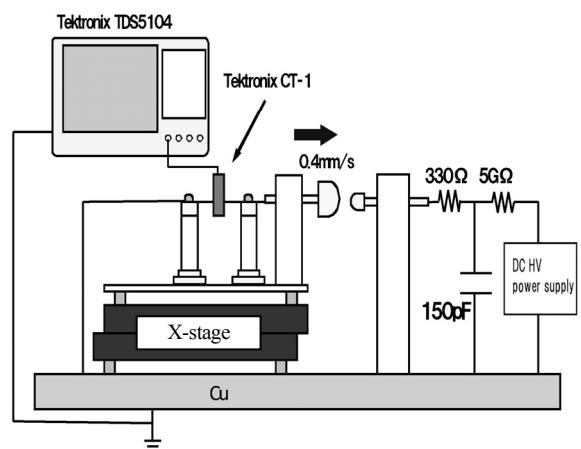


図3 金属間放電の実験装置

Fig. 3 Experimental apparatus for ESD from charged metal and fingertip.

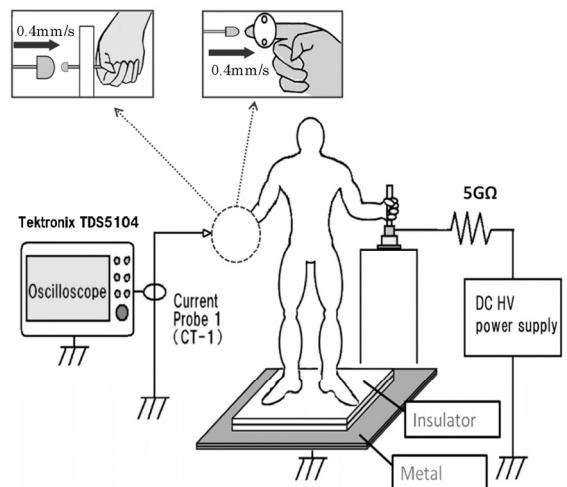


図4 金属ツール放電および指先放電の実験装置

Fig. 4 Experimental apparatus for ESD from metallic tool and fingertip.

高電圧電源により電位を印加し、接地金属板上の厚さ 27 mm の絶縁板の上に裸足で立った被験者を、 $5\text{ G}\Omega$ の抵抗を介して充電させる。この時の被験者の静電容量は ESD ガンに等しい 150 pF である。

金属ツール放電および金属間放電で使用した高圧側の電極は、ESD ガンの気中放電用チップのヘッドの曲率半径 ($= 4.6\text{ mm}$) に近い、 5 mm の半球電極である。接地側電極は 15 mm の半球電極を使用したが、指先放電時のみ、指先の曲率半径が約 15 mm である為、 5 mm の電極を使用した。また、被験者の指先の皮膚抵抗は $3.15\text{ M}\Omega$ である。人体の静電容量及び皮膚抵抗は、過去に報告した方法³⁾を用い測定した。測定は相対湿度 $15 \pm 2.5\%$ 、室温 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、大気圧 $1010 \pm 10\text{ hPa}$ の条件で行い、測定回数は各条件で 20 回とした。

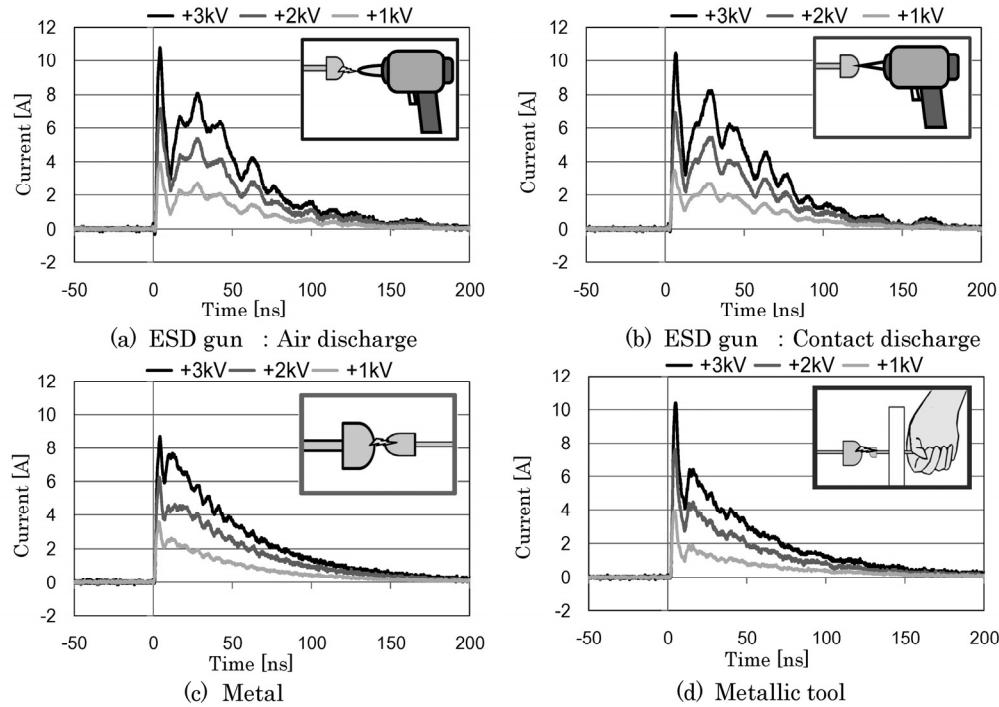


図5 各種放電源の放電電流波形

Fig. 5 Waveforms of discharge current.

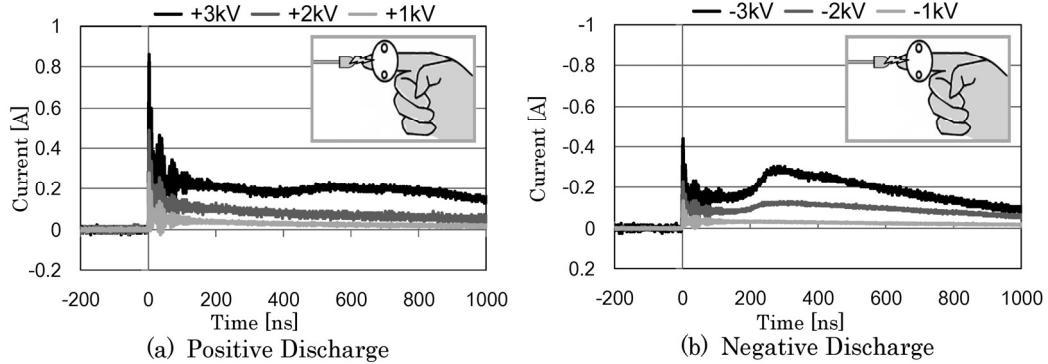


図6 指先放電の放電電流波形

Fig. 6 Waveforms of discharge current from fingertip.

3. 結果および考察

3.1 各種放電源からの代表的な放電電流波形

図5(a)～(d)に、帯電電位を+1, +2, +3 kVとした時の、ESDガン（気中放電および接触放電）、金属間放電、金属ツール放電の放電電流波形を示す。

ESDガンの気中放電と接触放電を比較すると、放電電流波形形状には明確な差異は無く、ほぼ同様の波形形状となった。また、金属間放電と金属ツール放電では、各放電電流は2つのピークを持つ波形となるが、ESDガンからの放電に比べて、2番目のピークが早く出現する波形となった。

図6(a)および(b)に、指先放電の正放電および負放電における

放電電流波形を示す。

指先からの放電は、図5に示す4種類の放電に比べて、ピーク電流値は極端に小さく、放電時間は1μs以上と、非常に長くなることがわかる。これは、皮膚抵抗(3.15 MΩ)の影響により、ピーク電流値が低くなり、電流の減衰の時定数が大きくなることによるものである。

また、他の放電源からの電流波形では、極性による放電電流波形形状の差異は確認出来なかったが、指先放電では波形形状が明確に異なり、負放電の方が正放電に比べて、1ピーク目は小さく、2ピーク目の電流が大きくなつた。これは、正イオンの移動速度($=2\times10^5 \text{ cm/s}$)と電子雪崩の移動速度

($=2 \times 10^7 \text{ cm/s}$) の差により説明することができる。詳細は文献 4)を参照されたい。

3.2 ピーク電流値および立ち上がり峻度

図 7 の縦棒グラフに、帯電電位を+1, +2, +3 kVとした時の各放電源の平均ピーク電流値を、折れ線グラフに平均立ち上がり峻度を示す。平均ピーク電流値は+2 kVでは、大きい順に、金属ツール放電>ESD ガン(気中放電)>ESD ガン(接触放電)>金属間放電>指先放電となった。ESD ガンからの放電では接触放電の場合、他の放電源に比べてピーク電流値のばらつきが少なくなった。平均立ち上がり峻度は+1 kV および+2 kV では大きい順に、接触>気中となり、ピーク電流値の大きさに依存しなかった。

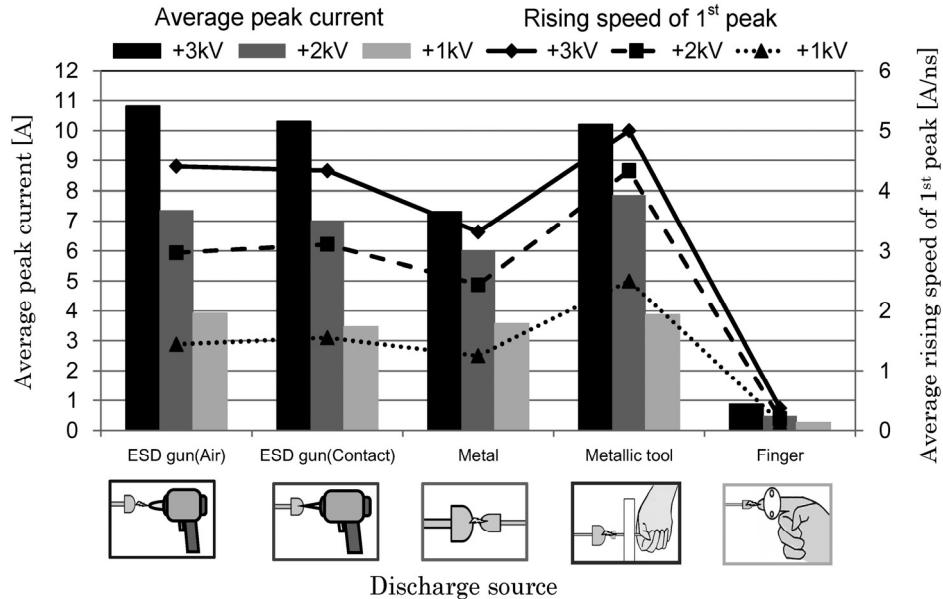


図7 ピーク電流値および立ち上がり峻度

Fig. 7 Peak current and Rising speed of 1st peak of discharge current.

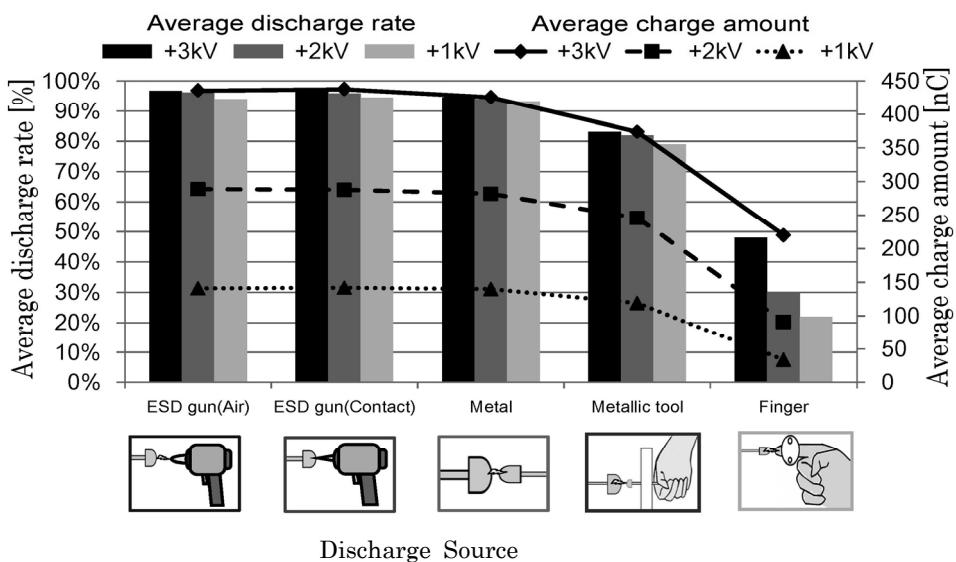


図8 初期放電率および放電電荷量

Fig. 8 Discharge rate and Charge amount of discharge current.

IEC61000-4-2 では、表 1 に示すように、充電電圧が+2 kV (厳しさレベルが 1) の場合、ピーク電流は 6.75~8.25 A、立ち上がり時間は 0.7~1 ns である。本実験の結果では、指先放電以外の放電において、ピーク電流値は 5.66~8.05 A、立ち上がり時間は 1.8~2.5 ns 程度となり、IEC 規格に比べてピーク電流値は近い値となり、立ち上がり時間は長くなつた。

3.3 平均初期放電率および平均放電電荷量

図 8 の縦棒グラフに、帯電電位を+1, +2, +3 kVとした時の各種放電源の各 20 回の測定波形の平均初期放電率を、折れ線グラフに平均放電電荷量を示す。初期放電率は、放電電流波形を積分することにより算出した放電電荷量の値を人体の帶電電荷量で除した値である。

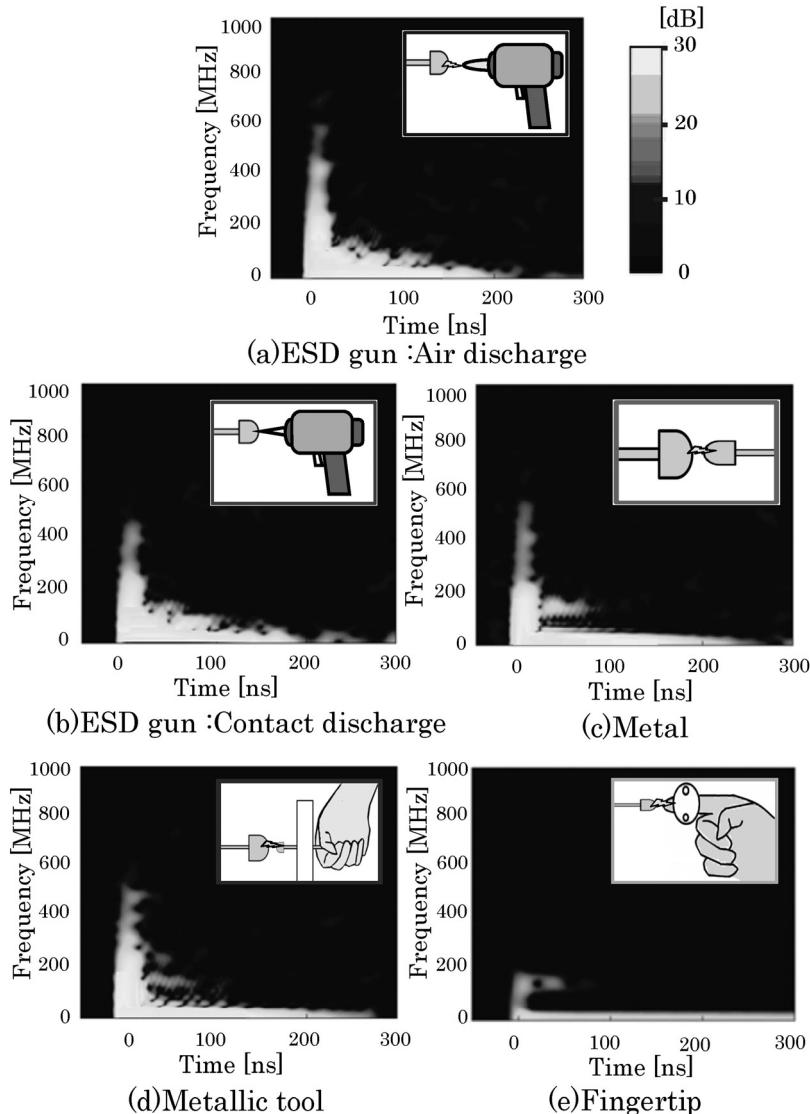


図9 各放電源のスペクトログラム(+2kV)

Fig. 9 Spectrogram of each discharge sources.(+2kV)

平均初期放電率および平均放電電荷量は、指先からの放電のときに極端に少ないことが分かる。金属ツール放電（手に持った金属からの放電）の場合も、ESD ガン（気中放電および接触放電）、金属間放電に比べ、12~15%程度少なくなる。このように、放電源に人体が関係してくると初期放電率は低くなり放電電荷量は少なくなる。

3.4 周波数成分

図9の(a)～(e)に帯電電位を+2 kVとした時の、各放電源からの放電電流波形から算出したスペクトログラムを示す。スペクトログラムの時間軸は、放電開始時を 0 ns とし -50 ~300 ns の範囲で示した。各スペクトログラムにおいて、時間、周波数における信号強度は、図9(a)の右端に示したスケールの濃淡で示されている。

観測した放電電流波形間の周波数成分の比較を行う為に、

周波数分布の相対的な違いが明確に現れるようにパワースケールの範囲を調整し、今回は最高周波数を決定する際の閾値を 15 dB とした。パワーが 15dB 以上となる領域を比較すると、ESD ガンの場合、気中放電が 700 MHz 程度の高い周波数を含んでいるのに対し、接触放電では、500 MHz 程度と低くなる。金属間放電および金属ツール放電では 600 MHz 程度となり ESD ガンの気中放電よりは低い周波数となるが、接触放電よりは高い周波数となった。

指先放電では 200 MHz となり、他の放電源に比べて 350~500 MHz 程度低い周波数となった。

3.5 各放電源の各パラメータの比較

表2に、帯電電位を±2 kVとした時の各放電源における各パラメータの平均値を示す。

表2 各種放電源における各パラメータの平均値(±2kV)

Table 2 Average value of each parameter in various discharge sources. (±2kV)

		ESD Gun		Metal	Human	
		Air	Contact		Metallic Tool	Finger
						
Peak Current [A]	+2kV	7.36	7.01	6.03	7.86	0.48
	-2kV	6.62	6.91	6.08	8.12	0.22
Rising speed of 1st peak [A/ns]	+2kV	2.97	3.11	2.44	4.33	0.20
	-2kV	3.01	3.08	2.36	4.15	0.08
Discharge Rate [%]	+2kV	96.3	96.0	94.0	82.0	30.0
	-2kV	95.0	97.6	93.7	82.3	28.0
Charge Amount [nC]	+2kV	289	288	282	246	91
	-2kV	285	293	281	247	86
Max Frequency [MHz]	+2kV	700	550	630	610	200
	-2kV	710	500	630	520	200

表2より、ピーク電流値および立ち上がり峻度は、他の放電源からの放電に比べて金属ツール放電が最も大きく、放電率および放電電荷量は、ESD ガン（気中放電および接触放電）が最も大きい値となった。また、指先放電は、他の放電に比べて全てのパラメータが最も小さくなかった。指先放電以外の放電源では、各パラメータにおいて、極性による明確な依存性は認められなかった。

4. まとめ

各種放電源からの ESD において、放電源と放電電流波形の関係を調べた結果、本報告で比較した各パラメータは、放電源に大きく依存する結果となった。従って、本実験結果における人体からの ESD では、図 1 および表 1 で示した IEC 規格と異なる放電電流波形および放電特性が確認できた。

本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 各帶電電位において立ち上がり峻度は、金属ツール放電が最も大きくなった。
- (2) 放電電荷量および初期放電率は、人体からの放電が、ESD ガンからの放電および金属間放電に比べて小さくなった。
- (3) 周波数成分は ESD ガンの場合、放電方法により最高周

波数が異なり気中放電の方が接触放電に比べて 120～220 MHz 程度高い周波数となった。

- (4) 指先放電は、他の放電源に比べて各パラメータの値が非常に小さくなり、ピーク電流値と立ち上がり峻度は極性による依存性が確認できた。

この研究の一部は、(株) 半導体理工学研究センター (STARC) の支援によるもので、ここに感謝の意を表します。また、本研究に従事されました、平成 22 年度卒業研究生の芳賀圭一郎氏、北條武史氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 静電気学会：静電気ハンドブック, p. 252, オーム社 (1998)
- 2) 増井典明：帶電した人体からの放電特性. 静電気学会誌, **31** (2007) 236
- 3) 吉原 宏, 吉田孝博, 増井典明：人体からの静電気放電に及ぼす接地電極形状の影響(III). 静電気学会誌, **34** (2010) 37
- 4) 片岡忠史, 澤井丈徳, 増井典明：帶電した人体からの放電電流波形. 静電気学会誌, **28** (2004) 310