

생체 임피던스

徐 丙 高*

1. 서 론

갈바니(Gaivani)가 생체에서 전기적 현상을 발견한 이래 생체 시스템의 전기적 속성에 관한 연구는 중요한 과제가 되어 왔다. 전자 측정기의 개발로 인한 현대식 측정 기술 개발이후 패시브(passive)한 전기적 특성들을 측정 가능하게 하였다. 포텐셜(potential)이론을 사용하여 그 패시브한 전기적 특성들을 설명하여 주는 기전(mechanism)을 세워 전기적 신호들의 전도 현상과 자극현상(excitability)의 원천을 이해하게 되었다. 특히 컴퓨터의 출현으로 수학적 모델링에 크나큰 도움을 주었을 뿐만 아니라 실험적으로 관측된 데이터를 효율적으로 처리할 수 있게 하여 자극 현상의 많은 사실을 이해할 수 있었다. 그러나 지난 수십여년간의 노력으로 생체의 전기적 현상에 대한 이해의 크나큰 진전은 있었으나 이러한 현상을 완전히 설명하여 주는 분자적 기전에 대한 이해는 아직 제한되어 있다.

생체 세포나 조직 그리고 이들을 구성하는 성분들의 액티브(active)하고 패시브한 전기적 특성에 대한 이해는 전기적 원리들의 진단적 및 치료적 응용때문에 의학에 있어서는 학문자체 뿐만 아니라 임상적인 측면에서 상당히 중요하다.

여기에서는 생체에서 일어나는 전기적 특성들을 이해하는 데 있어서 공간적인 역할을 하는 생체 임피던스에 대해서 중점으로 서술하고자 한다.

2. 임피던스의 정의

어떠한 물질의 전기적 속성물은 교류 전류에 의해 측정되어질 수 있고 임피던스, 즉 $Z=R+jX$ 로 표시될 수 있다. R 은 저항을 말하며 X 는 리액턴스이다. 또한

임피던스의 역인 어드미턴스 즉 $Y=G+j\omega C$ 로 나타낼 수 있다. G 는 콘덕턴스, C 는 커패시턴스, ω 는 각 주파수를 의미한다. R 과 G 는 전기적 에너지가 열로써 방출될 때 일어나고 X 와 C 는 손실이 없는 저장상태로부터 발생한다. 어떠한 임방 센티미터를 고려할 때 G 가 ohm^{-1} 으로 표현되었다면 G 는 전도율 $K \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ 되고 C 는 $C=\epsilon \times Cr$ 관계에 있다. ϵ 는 유전상수(dielectric constant)를 의미하며 Cr 은 자유공간(free space)에서 용량(capacity)을 나타낸다. ($Cr=0.0884 \mu\text{mf/cm}$) ϵ 과 K 의 값들은 전해질이나 세포막 같은 물질에 대해서는 비교적 광범위한 주파수 영역에 걸쳐서 일정하며 이들 변수들은 간단한 물리적 해석을 갖고 있기 때문에 생체구조의 분석과 묘사를 위해서는 편리하다.

생체 구조에 있어서는 에너지는 어떠한 장소에서 다른 장소로 이동하거나 어떠한 형태에서 다른 형태로 전환된다. ϵ 과 K 의 값은 주파수에 따라 변화하며 이러한 프로세스는 시간상수에 의해 나타낸다. 이와 같이 시간에 의존하는 전기적 현상들은 Schwan(1957)에 의해 잘 연구되었다. 그는 계단함수(step function)의 자극을 가했을 때 발생하는 응답 사이에 지수적 시간지연(T)이 임피던스와는 아래와 같은 관계로 나타낼 수 있음을 보였다.

$$Z=a+\frac{b}{1+j\omega T} \quad (1)$$

또한 자극과 응답 사이가 지수적 시간 지연이 아닐 때는 다른 기전에 의하기 때문에 다수의 시간 상수로 표시할 수 있음을 보였다.

$$Z=a+\sum \frac{b}{1+j\omega T_r} \quad (1)'$$

이러한 시간의 상관 함수로 되어 있는 극화(polarization)현상을 설명하는 2개의 기전이 존재한다. 그 하나는 정이온과 음이온의 분포 불균형으로 생겨나는 극성물질(polar molecule)의 존재로 인하여 자장에 따라 회전을 일으킨다는 것이다.

* 漢陽大學校 工科大學
 College of Engineering, Hanyang University

이러한 경우에는 시간 정수는 어떠한 분자가 자장과 함께 회전하는데 필요로 되는 시간을 말하며, 분자의 형태, 크기, 점성, 온도에 따라 변화한다. 다른 하나의 기전은 이질적(heterogeneous) 구조의 존재로 인한 것이다. 이러한 구조들은 서로 다른 전기적 속성들을 갖고 있는 물질들로 구성되어 있기 때문에 서로 다른 물질을 분리시키는 경계면들은 전하를 갖게 될 것이다. 이것을 이온의 이동을 가져오게 되며 시간을 필요로 하게 된다. 전자의 기전은 “극성이완(polar relozation)” 이라고 불리며 1929년 Debye에 의해 처음으로 연구되었고 후에 Böttcher(1952)와 Smyth(1955) 등에 의해서 연구되었다. 그리고 Kauzmann(1942)은 화학적 반응율 프로세스(chemical rate process)의 원리를 도입하여 이완현상 곡선의 대칭성(symmetrical phenomenon)을 설명할 수 있었다. 후자의 기전은 “구조적 이완(structural relaxation)”이라고 불리며 1914년 Wagner에 의해서 연구되었으며 “Maxwell-Wagner”이론이라고 부르기도 한다. 그리고 Cole(1928), Schaefer(1933), Dänzer(1934), Graul(1935), Fricke(1925, 1953) 등에 의해서 연구되었다. 사실상 생체적 구조는 이질성과 극성분자를 포함하고 있기 때문에 2개의 기전이 존재한다고 말할 수 있다.

생체에서 일어나는 극화현상은 이완기전에 의해 잘 설명될 수 있으며 혈액과 같은 간단한 세포의 서스펜션(suspension)에서는 쉽사리 발견된다. 그림 1에서 볼 수 있는 것 같이 계단함수의 포텐셜을 가했을 때 시간에 의존하는 극화현상을 볼 수 있다.

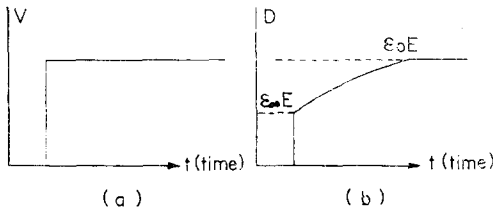


그림 1

그림 1(a)는 계단 포텐셜 함수를 나타내며 그림 1(b)는 이완현상을 보여주고 있다. D 는 다일렉트릭 디스플레이스먼트(dielectric displacement)를 나타내며 $\int_{-\infty}^T idt$ 에 의해 정의된다. 그림 1(b)는 관계식 $D(t) = \epsilon_{\infty}E + (\epsilon_0 - \epsilon_{\infty})(1 - e^{-t/T})E$ 으로 표시될 수 있다. 여기서 ϵ_0 은 저주파에서의 ϵ 의 값이며 ϵ_{∞} 은 고주파에서 ϵ 의 값이다.

ϵ 은 아래와 같은 관계식을 만족하면서 변화함을 Da-

nzer와 Rajewsky(1938)에 의해 입증되었다.

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega T} \quad (2)$$

식(2)는 아래와 같이 분리될 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + (\omega T)^2}; K = K_0 + (K_{\infty} - K_0) \frac{(\omega T)^2}{1 + (\omega T)^2} \quad (3)$$

여기서 $T = 1/2\pi f c \tau$ 시간상수이다. $f c$ 는 이산(dis-persion)의 중심에 있는 특정주파수(characteristic frequency)이다(Schwan, 1957).

식(3)에 의해 묘사되는 시스템에 시간 $t=0$ 에서 일정한 포텐셜을 가했을 때 우리가 구하고자 하는 생체 임피던스 관계식(4)를 유도할 수 있다.

$$1/V = K_{\infty} + (K_{\infty} - K_0)(1 - e^{-t/T}) \quad (4)$$

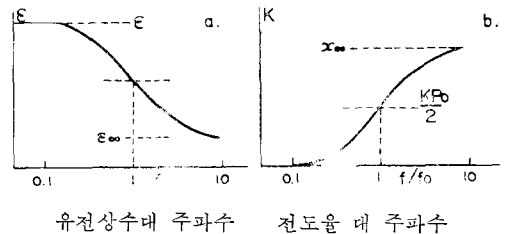
ϵ 과 K 의 관계식: $(\epsilon_0 - \epsilon_{\infty})Cr = (K_{\infty} - K_0)T$ 을 참조할 때 식(4)는 쉽사리 이해할 수 있다. 식(4)를 생체 임피던스로 정의한다.

대부분의 세포나 조직에서는 식(2)에서와 같이 하나의 시간상수로 표현될 수는 없을 것이다. 분석적 특성 및 이질성의 복잡으로 여러개의 시간상수로 식(1)과 같은 표현으로 매치되어야 할 것이다. 식(2)는 아래와 같이 표현될 수 있을 것이다.

$$\epsilon^* = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}) \int \frac{f(T)}{1 + j\omega T} dT$$

여기서 ϵ^* 는 복소수 유전상수를 말하며 함수 $f(T)$ 는 시간상수의 분포(distribution)를 의미한다. 그러나 실험적 결과를 간주할 때 식(2)로서 충분하다.

이완현상은 유전상수의 감소를 일으키며 콘탁턴스의 증가를 가져오게 한다. 이와 같은 현상은 아래의 그림에 잘 나타나 있다. 그리고 이 그림은 한개의 시간 상수, $T = \frac{1}{2\pi f_0}$ 일 때의 이완현상을 전제로 한 것이다.



3. 이완현상

이완현상은 시간상수들과 관련된 현상이다. 생체 물질의 유전상수(dielectric constant)는 주파수에 따라

변화하며, 3개의 주요 주파수 영역, 즉 저주파, 중주파 (radio frequency), 고주파(microwave frequency)에서 이산(dispersion)될 수 있는 것으로 알려졌다. 이들을 각각 α, β, γ 이산으로 부른다. 근육 조직에 대해 조사된 이산현상이 그림 2에 나타나 있다.

이들 이산현상은 서로 다른 기전에 의해 발생한다. 그림2에서 볼 수 있듯이 α 이산은 100c/sec 가까이 저주파 영역에서 일어나며 세포 멤브린들 사이의 경계면에서 발생하는 시간 지연의 과정에서 일어난다고 생각되고 있다. β 이산은 라디오 주파수 영역인 1Mc/sec 근처에서 일어나며 조직내에 있는 세포 멤브린의 용량(capacity)으로부터 발생한다. 이것에 대한 기전이 가장 잘 이해되고 있다. γ 이산은 고주파인 10~100KMc/sec 근처에서 일어나며 이것에 대한 기전은 내부 세포 구조와 이를 구성하고 성분들로부터 기인한다는 것을 내용으로 하고 있다.

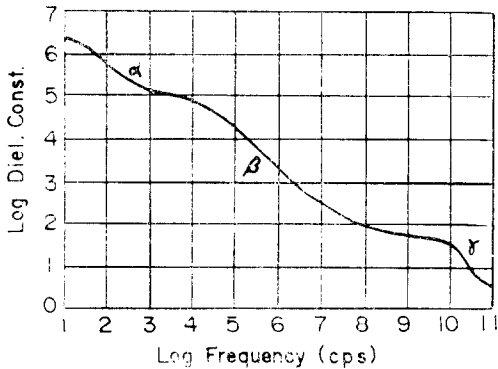


그림 2

표 3. (a) 특정저항

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
주파수	근육	간	폐	지라	신장	대뇌	지방조직	골 및 골수	전혈
1									
2	100Hz								166
3		1060							
4		800	800	1000			1500~5000		166
5	1KHz		970	400~850			1700~2500		147
6		980	700~1300	260~430			450~550		130~180
7									
8	10KHz	880	850						147
9									
10			460						
11	100KHz	170~250	220~550	165~200	250~500	150~270	460~850		147
12		520	550~800						
13									
14	1MHz	160~210	210~420	150~180	230~380	140~250	430~700		140
15		250	400~550						

이들 이산현상을 조사한 몇 가지 예를 아래와 같이 도시화 하였다.

이 도표로부터 보면 전해질이나 물은 α 와 β 이산에는 아무런 기여를 하지못한다는 것을 알 수 있다. 주파수가 변화함에 따라 유전상수의 변화($\Delta\epsilon$) 및 전도율의 변화(ΔK)를 이산크기(dispersion magnitude)라 한다. $\Delta\epsilon$ 와 ΔK 는 한 개의 시간상수만이 존재할 때는

표 1.

	α -이산	β -이산	γ -이산
전해질 및 물	없음	없음	20,000MC
단백질 및 다른 고분자 스펙션	없음	1~10Mc	〃
세포내액물질 (핵, 미토콘드리아)	없음	1~10Mc	〃
세포 스펙션, 박테리아 및 조직	0.1~10Kc	0.1~10Mc	〃

다음과 같은 식이 성립한다: $\epsilon_r \frac{\Delta\epsilon}{T} = \Delta K$ 이산크기는 물질에 따라 달라질 수 있을 뿐만 아니라 농도, 주변 이온의 종류, 온도 등과 같은 요소에 영향을 받는다. 이러한 요소들을 고려하여 최대값을 취한 이산크기는 3개의 이산영역에서 아래와 같은 값을 나타낸다.

표 2.

	α -이산	β -이산	γ -이산
$\Delta\epsilon$	5×10^6	10^5	75
ΔK (mho/cm)	0.1×10^{-3}	10^{-2}	0.8

16										
17	10MHz	150~170	180~260	110~150	150~170	120~170	300~450			90
18										
19		100~130	120~145	95~130	85~105	100~120	160~230	1170~1250		82
20	100MHz	120~160	150~200	100~140	110~150	100~150	200~300	1500	4100~5500	
21		140~200	180~210		150	130~160	220~260	2200~4300	1000~2300	
22		75~79	98~100					700~140		64~72
23	1,000MHz	81~84	92~100	137		81~82		1100~3500		50
24		77	100					2500		11
25		12	15~17					240~370	60~200	9.5
26	10,000MHz	13						210	100~130	

(b) 유전상수

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
주파수	근육	간	폐	지라	신장	대뇌	지방조직	골밀골수	전혈
1									
2	100Hz	$800 \cdot 10^3$	$900 \cdot 10^3$	$450 \cdot 10^3$			$150 \cdot 10^3$		
3		$1000 \cdot 10^3$							
4		$130 \cdot 10^3$	$150 \cdot 10^3$	$90 \cdot 10^3$			$50 \cdot 10^3$		
5	1KHz	$170 \cdot 10^3$							2900
6		$100 \cdot 10^3$							
7		$50 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$			$20 \cdot 10^3$		
8	10KHz	$90 \cdot 10^3$							2810
9		$50 \cdot 10^3$							
10									
11	100KHz	$30 \cdot 10^3$							2740
12		$20 \cdot 10^3$	$(7 \sim 12) \cdot 10^3$						
13									
14	1MHz								2040
15		$2 \cdot 10^3$	$(12 \sim 2) \cdot 10^3$						
16									
17	10MHz								200
18									
19			65~75				8~13		
20	100MHz								
21		69~73	72~74	88~90	83~84	70~75			72~74
22		49~52	46~47				4.3~7.8	4.3~7.8	58~62
23	1,000MHz	53~55	45~52	35	53~56		3.2~6		63
24		61	50				9.5		
25	10,000MHz	40~42	34~38				3.5~3.9	4.4~6.6	50~52
26		29					3.6	6	45

표 2에서 볼 수 있듯이 근육조직과 같은 생체물질에서는 동일 물질의 액체나 고체에 비할 때 유전상수 값이 상당히 높다. 이것은 세포 서스펜션(cell suspension), 조직, 이온 이동과정에서 볼 수 있는 이질적 구조를 고려할 때 쉽사리 이해된다.

4. 실험적 조사 자료

생체 임피던스의 측정은 많은 종류의 생물질에서 시도되었다. 제한된 지면 때문에 몇 개의 중요한 것만을

아래에 도표화할 것이다. 도표화된 자료는 교류전류로서 측정된 것이며 우리 신체 속에 존재하는 조직(tissue)의 전기적 특성을 보여 주고 있다. 아래에 있는 표 3(a)는 특정저항(specific resistance)을 표시화 했고 표 3(a)는 유전상수(dielectric constant)를 나타낸다.

표 4에서 [1]은 37°C에서 개의 조직 [2]는 25°C에서 개구리 조직 [3]은 180°C에서 양의 조직 [4]는 23°C에서 인간의 조직 [5]는 37°C에서 개의 조직 [6]과 [7]은 방온도에서 토끼의 조직 [8]과 [9]는 23°C에서 인간 및 다른 동물의 조직 [10]과 [11]은 37°C에서 인간의

표 4.

Data		Data		Data	
Coordinates	References	Coordinates	Reference	Coordinates	References
1 A-C, G	[1]	6 I	[16]	14 A-F	[4]
1 I	[3]	7 A-C, G	[1]	14 I	[6]
2 A	[2]	8 A	[2]	15 A	[7]
2 B	[1]	8 B	[1]	15 B	[8, 9]
4 A-C, G	[1]	8 I	[6]	17 A-F	[4]
4 I	[3]	9 A	[7]	17 I	[6]
5 A	[2]	10 B	[4]	19 A-G, I	[10, 11]
5 B	[1]	11 A-F (Resist.)	[1]	20 A-G	[4]
5 C, G	[5]	11 A (Diel. const.)	[2]	21 A, B, D-I	[12]
5 I	[6]	11 I	[6]	22 A, B, G-I	[13]
6 A	[7]	12 A	[7]	23 A-C, E, G, I	[14]
6 B, D, F	[8, 9]	12 B	[8, 9]	24 A, B, G	[17]
				25 A, B, G-I, I	[13]
				26 A, G, H, I	[15]

조직 [1]은 20°C에서 쇠고기와 돼지고기 [13]은 38°C에서 개와 말의 조직 [14]는 27°C에서 인간의 조직 [15]는 37°C에서 인간의 조직 [16]은 180°C에서 양의 조직 [17]은 22°C에서 쇠고기의 조직을 표시하고 있다. (이들 자료를 위해 참고문헌을 참조.)

5. 중요성

생체를 연구하는데 있어서 전기적 특성인 생체 임피던스에 대한 지식은 필요 불가결한 것이다. 몇가지 실 예를 들어보면 (1)이론적인 심전도는 신체표면 (body surface)에서 측정된 심장의 활동에서 생겨나는 전기적 포텐셜을 상응되는 간단한 제너레이터(generator)인 점에서 이해하려는 시도를 하고 있는 것이다. 심장과 다른 인체부분을 분리시키는 조직의 전기적 특성에 대한 지식은 신호를 만들어 내는 심장이 신호가 인체 표면에 도착하기 전에 변형(distortion) 되는지 여부를 결정짓는데 중요한 역할을 한다. (2) 고주파를 이용한 전기치료 기기인 diathermy에서도 고주파에서 조직의 전기적 특성에 대한 이해는 diathermy 기계에서 발생하는 전류가 높은 주파수에서 인체에 침투되는 현상 및 열을 발생시키는 현상을 이해하는데 필요 불가결한 것이다. (3) 인간에 대한 마이크로파(microwave)에 대한 영향은 상당히 큰 것으로 알려졌다. 조직에 대한 마이크로파 특성은 전자기파(electromagnetic wave)가

인체에 침투되는 현상을 결정짓는 중요한 요소들 및 흡수상수(absorption coefficient)를 정하는데 있어서 중요한 역할을 한다. 또한 이와 같은 지식은 임상적 치료에 응용될 뿐만 아니라 방사선이 인간에 미치는 영향을 연구하는데 있어서도 중요하다. (4) 최근에 임상적으로 각광을 받고 있는 암치료를 위한 열요법(hyperthermia)에 대한 연구에 있어서 암세포만을 파괴하기 위한 적정온도의 결정이 중요한 문제인데 이것에 대한 이론적 근거를 제공하여 줄 수 있을 것이다.

6. 결론

생체의 구성 요소인 세포 및 조직등에 대한 전기적 특성의 중요한 요소인 생체 임피던스에 대한 개념 및 정의를 서술하였고 주파수에 따라 변화하여 이완현상(relaxation phenomenon)이 일어난다는 사실이 언급되었다. 또한 이 현상중 3개의 주요한 이산(dispersion)이 있다는 사실도 명시되었다. 이러한 이완현상은 시간지연(time delay)을 의미하는 시간 상수의 함수적 관계로 표시되어질 수 있음과 이 현상을 설명할 수 있는 기전을 간략하게 서술되었다. 다양한 생체 임피던스의 측정 자료가 많을지라도 이 중 몇 개만을 선정하여 본 논문 표3(a), (b)에 도시화 하였다. 이들 측정 자료들은 환경 조건 및 측정 기술에 따라 그 측정 값이 달라질 수 있기 때문에 좀 더 정확한 전자식 측정

기기의 개발과 표준적 자료를 작성하여 생체 분야에 종사하는 연구자에 도움이 될 수 있는 공인된 “사전(dictionary)”을 만들어야 할 것이다. 기전에 대해서도 많은 학설들이 있으나 가장 널리 인정되는 학설을 소개하였다. 이 기전에 대해 확실한 이해는 못하고 있으나 상당히 많은 연구자의 노력으로 많은 진척을 보여왔고 가까운 장래에 좋은 결과를 얻을 것으로 생각된다. 필자의 필력 부족과 제한된 지면으로 내용 전달에 미흡되었음을 사과하며, 의용생체분야에 종사하는 연구자들에게 다소나마 도움이 되길 바란다.

참 고 문 헌

1. 표 4 작성을 위해 :

- 1) Schwan, H.P. and C.F. Kay: *Circulat. Res.* 4, 664(1956) : 5, 439, (1957).
- 2) —Z. Naturforsch. 9b, 245, (1954).
- 3) —Z. ges. exp. Med. 109, 531, (1941).
- 4) Rajewsky, B.: *Results of biophysical research. Vol. 1, Leipzig: Thieme*, (1938).
- 5) Kaufman, W. and F.D. Johnston: *Amer Heart J.* 26, 42, (1943).
- 6) Fricke, H., and H.J. Cartis: *J. gen. Physiol.* 18, 821, (1935).
- 7) —Physics 1, 106, (1931).
- 8) Stachowlak, R.: *Ann. Physik* 37V, 495, (1940).
- 9) —Pflug, Arch. ges. physiol. 244, 570, (1941).
- 10) Schatter, H.: *Z. ges. exp. Med.* 100, 706, (1937).
- 11) —Erforschung U. Praxis Wärmebeh. Medizin, pp.71ft. Leipzig: *Steinkopff*(1937, 2).
- 12) —Fortschr. Rontgenster. 54, 59, (1936).
- 13) Osswalk, K.: *Hochfrequenztech. U. Elektroakust.* 49, 40, (1937).
- 14) Herrick, J.F., D.G. Jelatis and G.H. Lee: *Fed. Proc.* 9, 60, (1950).
- 15) Schwan, H.P. and K. Li: *Proc. I.R.E.* 41, 1735 (1953).
- 16) England, T.S. and N.A. Sharples: *Nature(Lond)* 163, 487, (1949).
- 17) Rajewsky, B., and H.P. Schwan: *Z. ges. exp. Med.* 113, 553, (1944).
- 18) Hartmuth, L.: *Z. Naturforsch.* 9b, 257, (1954)

2. 논문 작성을 위해 :

- Böttcher, C.J.F.: *Elsevier Press, Houston, Texas* (1952).
- Cole, K.S.: *J. Gen. Physiol.* 12, 29, 1928. 2.
- Dänzer, H.: *Ann. Physik*[V]20, 463 : [V]21, 783, (1934).
- Debye P.: *Physik.* 2, 13, 97.
- Debye P.: *The Chemical Catalog Co. N.Y.*, (1929).
- Fricke, H.: *Phys. Rev.* 24, 678, (1925).
- Fricke, H.: *Nature* 172, 731, (1953 C).
- Geddes L.A. and Baker L.E.: *Med. & Biol. Eng.* 5, 271, (1967).
- Graul, F. (1935) : *Ann. Physik*[V]24, 325.
- Kaugmann, W.: (1942). *Revs. Modern Phys.* 14, 12.
- Schaefer, H.: (1933). *Klin. Wochschr.* 12, 102.
- Schwan, H.P. and Kay, C.F.: *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, (1957).
- Smyith, C.P.: “*Dielectric Behaviour and Structure*”. McGraw-Hill, N.Y., (1955).
- Wagner, K.W.: *Am. Physik* 40, 817, (1913).