

## Detection and Measurement of Non-ionizing Radiations

Lee, Jai Ki

*Dept. of Nuclear Engineering, Hanyang University*  
17 Hangdang, Seongdong, Seoul, Korea 133-791

### 비전리방사선의 검출 및 측정

이 재 기

한양대학교 원자력공학과

**Abstract**—The state-of-the art of detection and measurements of non-ionizing radiations are reviewed in relation to protection requirements, especially for electromagnetic and ultraviolet radiations. Dosimetric quantities, instruments and considerations needed for measurement are briefly explained. For electromagnetic radiation, the power density levels from various practical sources are summarized for reference uses. Large errors remain in the measurements of non-ionizing radiations in general. Technical needs of development in measurement and dosimetry of non-ionizing radiations, therefore, are promising when the increasing public concerns about the adverse health effects of non-ionizing radiations and proliferation of their uses are taken into account.

**요약**—비전리방사선에 대한 방호의 관점에서 현재의 검출 및 측정기술을 검토하였다. 특히 전파와 자외선을 중심으로 노출계측량, 측정기기 및 측정시 고려사항을 설명하였다. 전파장에 대해서는 실제 파원별로 출력밀도의 수준을 요약하여 실무에 참고가 되게하였다. 대체로 비전리방사선의 측정에는 아직 큰 오차가 있으므로 늘어나는 비전리방사선원과 이로인한 유해한 건강영향에 대한 대중의 관심을 고려하면 비전리방사선 측정기술의 개발수요는 크다.

### 서론

아직은 논란의 여지가 없는 것은 아니지만 비전리 방사선도 우리의 건강에 유해한 영향을 미칠 수 있음은 지난 70년대부터 인식되기 시작하여 보편화되어가고 있다. 이에 따라 국제방사선방호학회(IRPA)는 20여년 전부터 그 관심의 대상을 전통적인 전리방사선에서부

터 확대하여 비전리방사선 방호전문연구회(working group)를 발족시켰으며 1977년 파리 총회에서는 부설조직으로 국제비전리방사선위원회(International Non-Ionizing Radiation Committee ; INIRC)를 설치하여 WHO, UNEP 등 유엔기관과 협조하여 비전리방사선 방호문제를 다루어왔다. 이러한 노력의 결과로 1983년에는 “공중초음파와 100kHz 내지 300GHz

전자파 노출한도에 관한 잠정치침[1, 2]을 마련한 데 이어 1984년에는 “180nm 내지 400nm 파장의 자외선 노출한도에 관한 지침[3]”과 “180nm 내지 1mm 파장의 레이저 노출한도에 관한 지침[4]”를 펴내기에 이르렀으며 이후 그 활동범위를 넓혀가고 있다[5, 6]. 한편 IEEE도 1992년에 “3kHz 내지 300GHz 전자기장 노출에 관한 안전기준[7]을 수립하여 발표하였다.

이렇게 비전리방사선에 대한 노출한도들이 설정됨에 따라 사람이 노출되는 양이나 노출장의 강도를 측정하는 기술이 필요하게 되는데 비전리방사선에 대해서는 전리방사선의 경우처럼 피폭하는 물질내에 생성되는 전하량이나 이로부터 유도되는 양을 측정하는 용이한 방법이 이용될 수는 없다는 어려움이 있다. 또 비전리방사선은 그 스펙트럼이 광범하여 초음파를 포함한 음파에서부터 극저주파 내지 극고주파까지의 전파, 그리고 자외선과 레이저를 포함한 광파까지를 망라하고 있는데 이들 각각의 물리적 특성에 따라 측정법도 달라질 수 밖에 없다%8%. 이들 모두에 대한 측정기술을 논의하는 것은 너무 방대하므로 여기서는 전파와 자외선에 한정하여 측정원리와 기법, 그리고 실제 방사선장의 강도에 대한 기술현황을 살펴보고자 한다.

전파의 측정

전파에 노출되는 데 관한 기본적 물리량은 표1에서 보는 것과 같이 외부 전파장 강도를 나타내는 양으로서 전기장, 자기장, 방사출력, 출력밀도 및 포인팅벡터 등이 사용되며 물체에 흡수되는 전파에너지의 양 즉, 노출을 나타내는 양으로서 흡수파력과 비흡수율(Specific Absorption Rate ; SAR)이 주로 사용되고 있다 [9]. 이중에서 특히 방사선장에 대해서는 출력밀도, 노출량에 대해서는 비흡수율이 널리 사용된다.

이와 같은 양들을 측정하는 데 사용하는 측정기도 일반적 측정기와 마찬가지로 검출기부와 지시부, 그리고 검출기 신호를 지시부 출력으로 변환하는 변환부로 구성된다. 지시부는 아날로그 또는 디지털로 표현할 수 있으며 변환부는 검출기 신호의 특성에 따라 적절한 전자회로로 구성된다.

전파측정을 위한 검출기부는 안테나인데 그림1에서 보는 것과 같이 전기장 측정에는 도선으로 된 선형 쌍극안테나가 기본적인 것이며 자기장 측정에는 원형 안테나가 사용된다. 그림1의 기본형 안테나는 방향성이 있기 때문에 측정의 등방성을 위해 그림2에서 예시한

Table 1. Dosimetric Quantities for Electromagnetic Waves

Quantities	Symbol	Unit	Definition
<b>External</b>			
Electric field	E	V/m	$E=F/q$
Magnetic field	H	A/m	$H=B/\mu$
Radiate power	P	W	
Power density	S	W/m <sup>2</sup>	
Poyinting vector	S	W/m <sup>2</sup>	$S=E \times H$
<b>Internal</b>			
Absorbed power	P	W/kg	$P=\sigma E^2$
Specific Absorption rate	SAR	W/kg	

q : electric charge G : antenna gain d : distance  $\mu$  : permeability  $\sigma$  : permittivity

것과 같이 세쌍의 기본형 안테나를 상호직교하도록 조합하여 사용한다. 전기장 측정용 쌍극 안테나의 길이는 원칙적으로 측정하려는 전파의 파장보다 길지 않아야 한다. 그림 1이나 그림 2의 안테나는 기본적으로 광역밴드에 감응하는 것이며 전자파 스펙트로메트리 등 특정 파장의 전파 측정을 위해서는 특수형의 안테나와 필터 등을 사용한다.

안테나의 전파에 대한 감응의 원리는 전자파에너지 흡수에 따르는 발열이므로 변환부의 기본은 열을 전기신호로 변환하는 방식이된다. 따라서 여기에는 써미스터를 이용한 볼로미터, 열전대 또는 다이오드가 사용될 수 있다.

전파 측정용 필드 서베이 장비에 바람직한 요건으로 등방감응을 들 수 있는데 상용기기들의 등방감응도는  $\pm 0.5dB$  정도이다.<sup>1)</sup> 또 다양한 주파수에 대하여 균일하게 감응하는 것이 바람직하나 변환부의 설계, 주파수 범위에 따라 -3dB에서부터 +2dB까지 오차가 나는 것이 보통이다. 일반적으로 전파 측정기기의 오차는  $\pm 2dB(+58\%, -37\%)$ 의 범위에 있는데 이렇게 큰 오차를 감수할 수 밖에 없는 것은 기기 자체의 성능 문제도 있지만 측정시 기기나 측정자가 본래의 전파장을 교란하는 효과도 있기 때문이다.

전리방사선의 경우와 마찬가지로 전파장에서도 단순한 출력밀도가 이에 노출되는 사람의 위해도를 전적으로 결정하지는 않는다. 즉, 그림3에서 보인 바와 같이 전파흡수체의 반응도를 나타내는 유전상수(die-

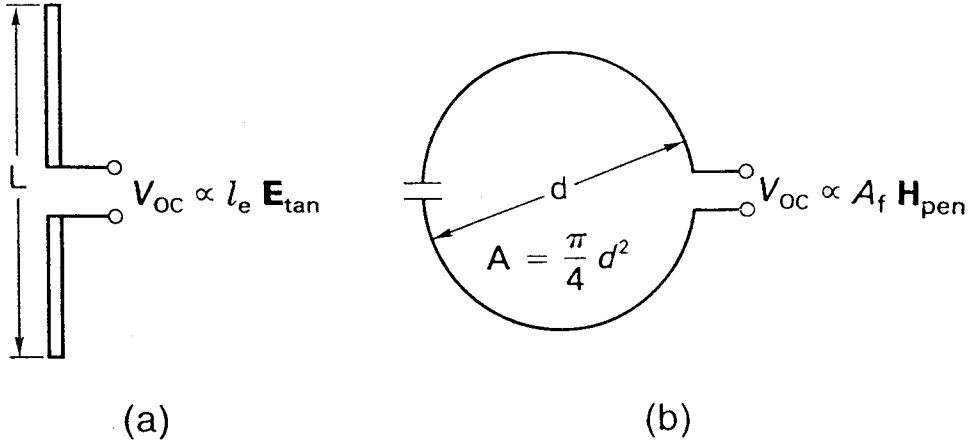


Fig.1 (a) A dipole antenna for electric field measurement (b) A closed-loop antenna for magnetic field measurement.

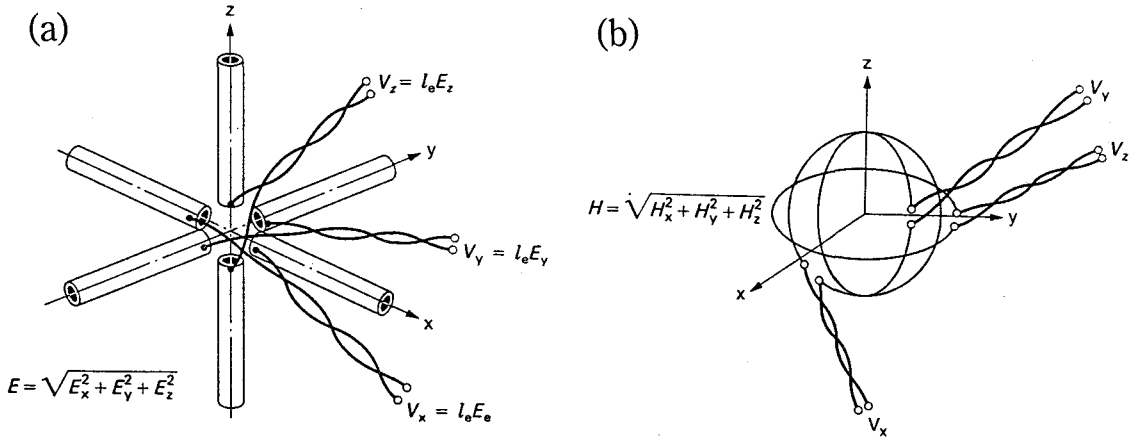


Fig.2 Three mutually orthogonal elements for isotropic response (a) for electric field (b) for magnetic field[9].

1) 전파의 측정 정밀도는 dB로 나타내는데 dB는 다음과 같이 정의된다.

$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_0} = 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_0} = 20 \log_{10} \frac{I_1}{I_0}$$

따라서 +0.5dB은 출력으로는  $\frac{P_1}{P_0} = 10^{\left(\frac{0.5}{10}\right)} = 1.12$ 에서

+12%를, -0.5dB은

$$\frac{P_1}{P_0} = 10^{\left(\frac{-0.5}{10}\right)} = 0.891 \text{에서 } -11\% \text{를 의미한다.}$$

lectric constant)는 주파수에 따라 변하기 때문에 인체의 노출정도를 결정하기 위해서는 전파장의 스펙트럼을 알아야 한다. 전파장의 스펙트럼은 그림4에서 예시한 것과 같이 협역밴드 필터들이 장치된 주파수 분석기를 사용하여 측정할 수 있다.

전파의 측정에서 주의할 점의 하나는 전파장의 강도가 파원으로부터 거리에 따라 단조감소하지는 않는다는 점이다. 그림5는 파원으로부터 거리에 따른 전파장 출력밀도의 관계를 보인 것으로서 원거리에서는 출력밀도가 거리의 제곱에 역비례하는 전형적 특성을 보이지만 근거리에서는 빠르게 증가 또는 감소하는 요동현상을 나타내고 있다. 따라서 송신안테나 근처에서의 측정은 위치별로 세밀하게 이루어져야 한다.

인체조직에 흡수되는 전파에너지의 양인 비흡수율 (SAR)의 측정은 기본적으로 칼로리메트리 또는 온도 측정의 원리에 따른다. 즉, SAR은

$$SAR = C_s \frac{T_c(\text{exposed}) - T_c(\text{control})}{t}$$

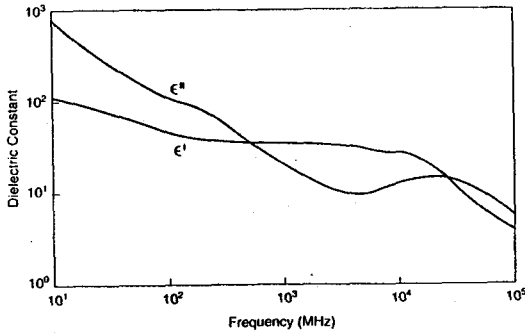


Fig.3 Frequency dependency of the dielectric constant of a simulated tissue. The dielectric constant is given by  $\epsilon = \epsilon_0(\epsilon' - i \epsilon'')$ .

로 산출되는데 여기서  $C_s$ 는 물체의 비열,  $T_e$ 는 유효 온도,  $t$ 는 노출시간이다.

표2는 주변에서 실제로 접할 수 있는 전자기파원에 대하여 주파수 범위, 출력, 노출정도, 측정기기 등을 요약하여 정리한 것이다. 특기할 사항은 의료기기인 electrosurgical/cartery unit나 전자렌지 등 특별한 장치들에 대해서는 범용 측정기 대신 특수설계된 것을 사용해야 한다는 점과 UHF 및 VHF의 텔레비전 전파는 협역밴드 안테나를 이용해 그 비데오 신호를 측정해야 한다는 점이다.

자외선의 측정

자외선 측정에는 자외선의 광전효과, 열효과 또는 화학효과를 이용할 수 있다[8, 10]. 광전효과를 이용하는 방법은 광전증배관, 광다이오드, 광전진공관, 실리콘다이오드 또는 GaAs광전다이오드 등 방출된 광전자를 전기신호로 변환하여 측정하는 것이다. 특히 광전증배관은 민감하므로 강도가 낮은 자외선장 측정에 적합하다. 이 방법은 자외선에 노출된 검출기에서

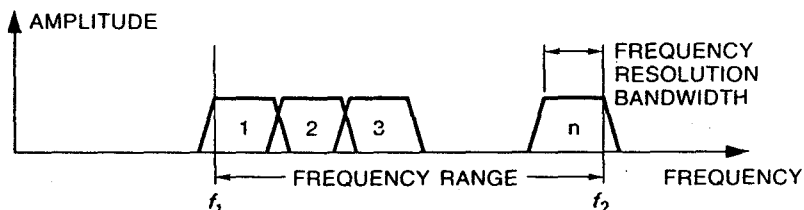
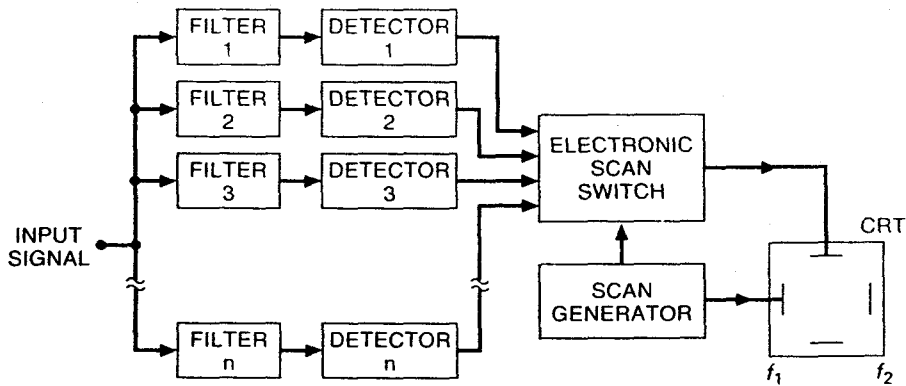


Fig.4 A multi-channel analyzer consisting of a set of narrow bandpass filters, each tuned to a different frequency[9].

Table 2. Characteristics of practical radiofrequency fields.

RF Sources	Frequency	Power	Exposure	Measure	Remarks
AM radio	535-1095 kHz	250W-50kW	1kW : 10V/m @ 50m 10kW : 10V/m @ 110 m	E-FSM	Broadcast
FM radio	88-108MHz	10W-100kW		F-FSNM	Broadcast
VHF&UHF	Ch.2-6 : 54-88MHz	10-100kw		Narrow	TV
	Ch.7-13 : 174-88MHz	316kW		band of	
	Ch.14-69 : 470-88MHz	5MW		video	
Microwave radio	1-40GHz	100mW- 20W		Isotropic E-FSM	
SATCOM	100MHZ- 275GHz	a few 10s W -kW/chan.	(a few 10s $\mu$ W/cm <sup>2</sup> )	Isotropic E-FSM	
Hand-held radio& cordless cellular phone	27-50MH 40-60MHz 800-900MHz 150-170MHz 450-512MHz 27MHz(CB)	transceiv : <10W cordless : <1W cellular : <0.6W transport : <3.5W	E $\approx$ 200V/m @ a few cm Peak SAR <1 W/kg	Isotropic E-H-FSM	Radio Cordless phone Cellular phone
Mobile radio	27-50, 150-170, 450-512, 800-900 MHz	3-a few 100s W	S $\approx$ 1Mw/cm <sup>2</sup> @1m	Isotropic	Vehicle mounted
Diathermy equipment	13.56, 27.12MHz (short wave) 2450MHz (microwave)	50-200W higher power	>10mW/cm <sup>2</sup> @60cm <10mW/cm <sup>2</sup> @1m	Isotropic E-FSM	Medical heat therapy
Electro-surgical/cautery unit	0.5-2.4MHz	No intentional	E $\approx$ some 100s V/m H >0.1 A/m@30cm from knife	Special SM	Strong EMI
Hyperthermia equipment	13.56, 27.12, 433, 915, 2450MHz (fixed) 1-1000MHz(varia.)	25W(interstitial applicator) 2kw(regional heater)	small applicator : S <10mWcm <sup>2</sup> @10cm regional heater : S $\approx$ 10mW/cm <sup>2</sup>	Isotropic E-H-FSM	

Table 2. (continued)

RF Sources	Frequency	Power	Exposure	Measure	Remarks
MRI	1-100MHz, pulsed Static H-field : 0.1-10 T/s	~100W (10kW peak)	0.4W/kg peak average SAR for 6 min. Magnetic : 0.1-2 T/s	Isotropic E-H-FSM Gauss metr	
Radar	>1 GHz (300MHz excep.)	40-80kW, pulsed (rms≈ 80W)		Time averag FSM	
Police & sports radar	10.525, 24.15, 35GHz	<100mW(35mW typ.)	S<1mW/cm <sup>2</sup> @30cm	Isotropic FSM	
Industrial microwave heater	915, 2450MHz	over 1kW	S<1mW/cm <sup>2</sup> @shield surface	Isotropic E-FSM	
RF induction heater	60Hz-8MHz	300W-5000kW	11.3-11300V <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> 0.01-300A <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> (work area)	Broadband isotropic RF SM)	
RF dielectric heater	3-100MHz	0.5-1000kW	E : 0.001-1500V/m H : 0.01-6.5A/m	Broadband isotropic RF SM	
Anti-thief devices	VLF, LF, HF may accompany microwaves	a few mW	<0.1 mW/cm <sup>2</sup> @5cm LF<100V/m (harmless)	Broadband microwave E-SM	
Microwave intrusion alarm	10.5GHz	<10W	<1mW/cm <sup>2</sup>	Isotropic microwave E-SM	
Microwave oven	915-2450MHz	600W-somekW	<0.1 mW/cm <sup>2</sup> @ user location	Special SM for oven	
VDT	No intentional 15-200kHz	No intentional total input<100W	E<50 V/m Displacement H<0.5 A/m	current sensor	

ERP : Effective Radiate Power[W] EMI : Electromagnetic Interference FSM : Field Surveymeter SATCOM : Satellite Communication  $\eta$  : antenna aperture/reflector efficiency P : antenna input power[W] r : distance from antenna[m] A : antenna aperture area[m<sup>2</sup>]

직접 출력되는 신호를 처리하는 방식이므로 주로 필드서베이미터에 활용된다. 써모파일 등을 이용하면 열효과에 의해 자외선량을 측정할 수 있으나 열측정의 어려움으로 인해 널리 사용되지는 않는다.

화학효과를 이용하는 방법으로는 몇몇종의 필름들이 사용되고 있다. 예를들면 폴리설펜 필름은 250-335nm 파장의 자외선에 민감하며 그외에도 포노다이아진 필름이나 청색 슬라이드 제작에 사용되는 다이아조 필름도 사용할 수 있다. 중하전입자에 대해 고체비적점 출기로 사용되는 CR-39 필름도 UVB(315-280nm)에 감응한다. 필름은 누적 노출량을 측정하게 되므로 개

인선량계로 사용할 수 있다. 그러나 전리방사선의 경우에서처럼 필름의 감응이 파장에 따라 큰 폭으로 차이나므로(그림6 참조) 필터 기법을 사용하는 등 보완기술이 필요하다. 자외선 스펙트럼의 측정에는 회절을 이용한 마노크로메터가 사용된다.

#### 논의 및 결론

비전리방사선 측정기술은 기본적 측정오차가  $\pm 2$ dB 정도로 크며 아직 잘 정립된 수준에 이르지 못하고 있다. 측정기술에서의 이러한 실태를 Carn과 Gabriel [11]이 정리하여 보여주고 있는데 이에 따르면 주파수

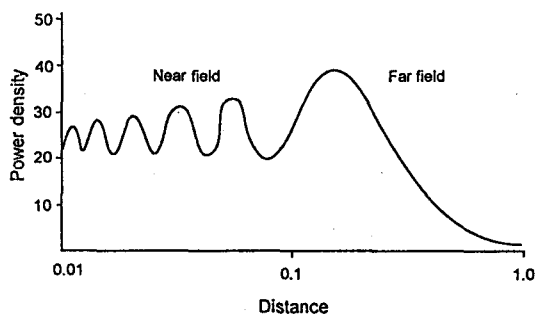


Fig.5 Variation in power density near a source. In the far-field, the power density decreases with the square of the distance from the source.

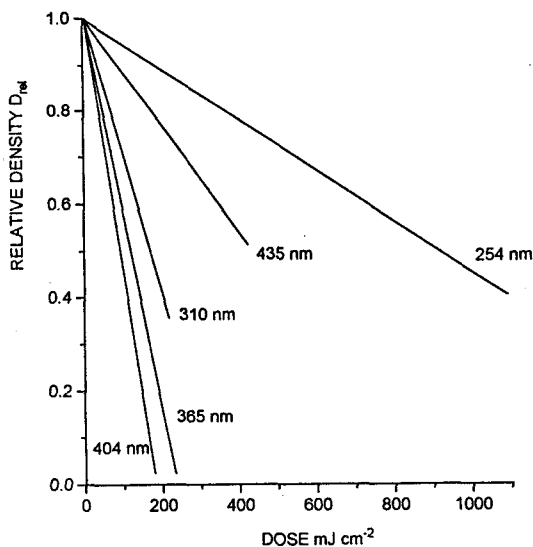


Fig.6 Response of diazochrome film to UV radiations.

1 GHz 이하의 전파의 경우 인체에 일정한 에너지흡수율을 유발하는 출력밀도가 측정자에 따라 100배 이상까지 차이를 보이기도 한다. Wong등[12, 13]이 측정한 바에 따르면 자외선의 경우에도 아직 상당한 측정오차 요인이 있다. 따라서 비전리방사선 측정기술, 특히 전파방사선이 인체에 전달하는 에너지량의 측정은 개선의 여지가 많다. 전자공학기술의 발전으로 문물연 정보통신시대가 고도화될 수록 생활 환경이나 직업환경 중 전파장은 증가할 것이므로 비전리방사선의 건강 유해성에 대한 입장이 정리될 수록 비전리방사선 분야의 측정수요는 증가할 것이며[14] 이에 따라 측

정기술도 개선되어 나갈 것이다.

## 참고문헌

1. INIRC/IRPA, "Interim guidelines on limits of human exposure to airborne ultrasound", *Health Physics*, **46**(4), 969-974(1984).
2. INIRC/IRPA, "Interim guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz", *Health Physics*, **46**(4), 975-984(1984).
3. INIRC/IRPA, "Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm(incoherent optical radiation)", *Health Physics*, **49**(2), 335-340(1985).
4. INIRC/IRPA, "Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1 mm", *Health Physics*, **49**(2), 341-359(1985).
5. INIRC/IRPA, "Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz", *Health Physics*, **54**(1), 115-123(1988).
6. INIRC/IRPA, "Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields", *Health Physics*, **58**(1), 113-122(1990).
7. Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz*, C95.1(1991).
8. H. Moseley, *Non-Ionizing Radiation*, Adam Higler, Philadelphia(1988).
9. US NCRP, *A Practical Guide to the Determination of Human Exposure to Radiofrequency Fields*, NCRP report No. 119, NCRP, Bethesda(1993).
10. A. Davis, G. H. Deane and B. L. Diffy, "Possible dosimeter for ultraviolet radiation,"

- Nature*, **261**, 169–170, 1976.
11. H. Carn and C. Gabriel, “Present knowledge about specific absorption rates inside a human body exposed to radiofrequency electromagnetic fields,” *Health Physics*, **68**(2), 147–156, 1995.
  12. C. F. Wong et al., “Measurement of human exposure to ultraviolet-B solar radiation using a CR-39 dosimeter,” *Health Physics*, **63**(4), 457-461, 1992.
  13. C. F. Wong et al., “UV-B Radiometry and Dosimetry for Solar Measurements,” *Health Physics*, **68**(2), 175–184, 1995.
  14. D.O. Carpenter and S. Ayrapetyan, ed., *Biological Effects of Electric and Magnetic Fields*, Academic press(1994).