

## 무질서한 매질에서 침투깊이와 파동 전파

김기준<sup>†</sup> · 성기천

대전대학교 공과대학 화학공학과  
(2005년 10월 20일 접수 : 2006년 2월 28일 채택)

### Penetration depth and Wave Propagation in Random Media

Ki-Jun Kim<sup>†</sup> · Ki-Chun Sung

*Department of Chemical Engineering, Dae-jin University, Pochun 487-711, Korea  
(Received October 20, 2005 ; Accepted February 28, 2006)*

**Abstract** : The influence of fluorophor, scatterer, absorber in turbid materials by light scattering were interpreted for the scattered fluorescence intensity and wavelength, it is studied the molecular property by laser induced fluorescence spectroscopy. It can be found that the effects of optical property are penetrated in scattering media by the optical parameters( $\mu_s$ ,  $\mu_a$ ,  $\mu_t$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ ). The value of scattering coefficient  $\mu_s$  is large appeared by means of the increasing particles of scattering, it can be found that the slope appears exponentially as a function of distance from laser source to detector. It may also utilize in designing the best model for oil chemistry, laser medicine and application of medical engineering.

**Keywords** : turbid material, light scattering, scattered fluorescence intensity  
laser induced fluorescence spectroscopy, optical property, scattering media.

### 1. 서론

오랫동안 혼탁 물질계에서 산란, 흡수계수의 물리적 의미가 불확실 하였으나, laser등의 강력한 energy source의 발명과 반사율 문제에 대한 분석에서, 산란 단면적과 흡수 단면적[1-3]에 의해 optical parameters(광학적 매개변수)의 해석이 가능하게 되었다. 페인트, 제지, 분필등의 공장, 식물이나 동물의 조직세포 등에서, 우리생활의 대부분 혼탁 물질계와 접하고 있다고 해도 과언이 아니다. 오늘날 종양에 대한 분자생물학

적인 연구와 면역학에 대하여 원인과 치료법을 연구하고 있으나, 외과적인 수술로 종양세포를 완전히 제거할 수 없을 뿐만 아니라 방사선 치료와 약물 요법에서 항암제의 대부분이 높은 독성을 가지고 있기 때문에 종양세포 뿐만 아니라 정상세포에도 작용하여 부작용을 줄 수 있다[4]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 항암제를 종양세포에만 선택적으로 수송하여 치료함은 물론, 정상세포에 영향을 미치지 않게 하는 연구들이 많이 진행되고 있다[5-6]. 1985년경에 Dougherty는 photodynamic therapy(PDT)에서 인체에 발생하기 쉬운 많은 종양에 대해 새로운 치료 모델링[7]을 제안하였으나, 이 분야에 대한 연구는 주로 생의학 분야[8]에서 활발히 진행되

<sup>†</sup> 주저자 (e-mail : kjkim@daejin.ac.kr)

고 있고 아직 초기 단계에 있다. 따라서 본 연구는 이 분야에 필요한 LIF(laser induced fluorescence) spectroscopy[9]의 생의학적 응용에서 종양의 진단 및 치료를 효과적으로 이용할 수 있도록 모델링을 세우는 데 있다. 산란 매질에서 빛 에너지의 전파를 특징적 분광학의 발전과 therapeutic laser delivery의 dosemetry에서, PDT의 임상실험과 광생물학 등의 분야에서 응용되고 있고, 특히 살아 있는 조직에서 비파괴적 흡수 및 산란의 측정은 광학적 특성을 결정하는 데 가장 중요한 요소이다[10]. 따라서 빛의 정확한 양이 조직에 전달되어 빛 중에서 조사의 차이에 따라 효과적, 비효과적, 치명적인 손상도 입게 되는 치료가 될 수도 있다[11].

본 연구는 laser와 detector의 발달, 광섬유(optical fiber) 및 personal computer의 발달로 인하여 LIF spectroscopy에 real time[12]과 in situ spectroscopy[13]를 가능하게 해주었다. 그러나 실제로 Beer의 법칙이 적용되지 않은 "optically thick"한 조건에 있다. 또 다른 문제는 피부의 형광 분광학과 같은 fluorophor가 scattering media에 있는 경우이다. 이 경우 스펙트럼은 fluorophor, absorber 및 scatter의 농도, 위치 및 성질에 따라 스펙트럼의 모양이 달라지게 된다[14]. 이는 빛이 scattering media에서 마치 확산하는 것처럼 움직이며 absorber에 의해 소멸되고, 또 fluorophor에 의해 생성되는 복잡한 과정으로 빛의 경로에 따라 세기가 달라지는 현상을 분석할 수 있도록 optical parameter(광학적 매개변수)[15]에 대한 측정방법을 고찰하였다. 본 연구에서 첫째 목적은 scattering media에서의 fluoresced spectral lineshape이 산란체, 형광체 및 흡수체의 특성, optical geometry에 대한 토대를 세우는 것이다. 목적은 laser와 광섬유와의 연결기술, 광섬유를 이용한 광전달 등을 조사하였다.

## 2. 실험

인체의 세포조직은 산란체이거나, 흡수체(melamin, hemoglobin)이며, 항암제가 대부분 형광물질이기 때문에 형광체로 Hematoporphyrin Derivative(HPD)와 rhodamine 6G(RA-6G)를 사용했다. 실험은 single line mode의 argon ion laser(미국 Coherent Co.,

Innova70 파장 514.5 nm)를 사용하였고 형광 세기는 520 부터 900 nm 사이에서 측정하였다. Laser beam은 산란체(intralipid), 형광체(RA-6G), 흡수체(india ink)가 들어 있는 모의 system에 비추며, 광섬유(4mm)를 사용하여 측정된 빛을 모아서 광전자 배증관으로 검출하였고, photon counter로 photon intensity를 측정하였다. 실험장치는 Fig. 1과 같다.

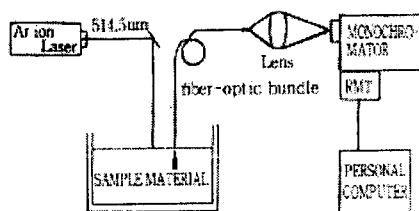


Fig. 1. Diagram of experimental apparatus.

또한 지속파(CW) argon laser를 사용하여 dye laser (Coherent Co. USA, CR-599)를 synchronly pumping 하였고, 염료는 RA-6G를 사용하였다. 산란된 빛은 광섬유를 통하여 중간 정도의 밀도를 지닌 필터를 지나 monochromator (SPEX, model 1870, 50 Cm focal length, groove 1800개/mm)에 들어가는 데, monochromator의 파장은 minidrive (SPEX, model 1872)로 작동하며, monochromator에 연결된 광전자 배증관 튜브(Products for Research Co., model RCA 31034 A)의 열잡음을 줄이기 위해 수냉식과 DC Power supply (Product for Research Co., model TE104RF)를 이용하여  $-20^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였다. 또한 digital photometer (SPEX, DPC-2), single photon amplifier discriminator (SPEX, model 453), photon counter (stanford research Co, USA, SR400)와 personal computer(CPU 80286)를 이용하여 측정하였다. Data Aquisition Board (National Instrument Lab-PC)등을 연결한 컴퓨터 인터페이스 시스템을 구성하여 산란체, 형광체, 흡수체의 농도를 변화시켜 가면서 매질의 산란세기를 거리에 따라 실험하였다. Phantom을 담은 용기는 표면반사, 투광도의 영향을 없애기 위해 크기 200 X 200 X 150 mm 인 검정색 통을 사용하였으며, laser source와 detector인 광섬유까지의 측정 위치를 마이크로메타가 부착된 Newport Co. 제품인 XYZ stainless

steel multi axis stage(model M-TSX-1A, Newport Co. USA)를 이용하여 phantom 용기에서 정확히 laser induced fluorescence에 따른 산란과 형광세기를 조사하였다. 실험에서 사용된 시료의 경우, 용매로 이차 증류수를 사용하였다. Absorption coefficients( $\mu_s$ )와 scattering coefficients( $\mu_a$ )를 결정하는 실험장치는 Fig. 2와 같다.

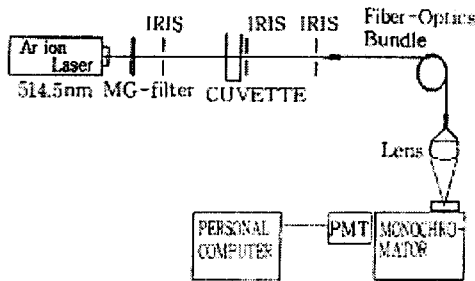


Fig. 2. Experimental setup for determination of  $\mu_s$  and  $\mu_a$ .

최근에 대부분 turbid 매질에서 빛의 분포는 빛을 광자인 입자로 간주하고 이들의 transport 이론에 의해 설명한다. Ishimaru는 diffusion theory에 의한 transport 식을 다음과 같이 나타냈다[1, 16].

$$(s \cdot \nabla r)L(r,s) = -\rho \sigma t L(r,s) + \frac{\rho \sigma t}{4\pi} \int_{4\pi} p(s,s')L(r,s')d\omega' \dots\dots\dots (1)$$

위 식에서  $L(r,s)$ 는 단위 벡터에 의한 방향에서 위치  $r$ 에서의 radiance ( $W m^{-2} sr^{-1} Hz^{-1}$ )이고,  $\rho$ 는 단위 부피당 산란 입자의 수 ( $mm^{-3}$ )를 나타내며,  $\sigma_s$ 는 single-particle의 scattering cross section ( $mm^2$ ),  $\sigma_a$ 는 single-particle의 absorption cross section ( $mm^2$ )를 뜻하고,  $\sigma_t (= \sigma_s + \sigma_a)$ 는 전체 cross section ( $mm^2$ )를 나타내고,  $\omega_0 (= \sigma_s / \sigma_t)$ 는 single-particle의 albedo이고,  $p(s,s')$ 는  $s'$  방향에서  $s(sr^{-1})$ 으로 산란되는 photon flux의 phase function를 의미한다.

경계조건에 의해 phase function을 규격화하면,

$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} p(s,s')d\omega' = \omega_0 \dots\dots\dots (2)$$

로 나타나고, 여기서  $d\omega'$ 는 solid angle (sr)의 element이며,  $\mu (= s \cdot s')$ 는 단위 벡터  $s$ 와  $s'$ 사이 각도로 부터 산란각의 cosine를 의미하고, Phase function은 다음식으로 주어진다.

$$p(\mu) = \omega_0(1-g^2) (1+g^2-2g\mu)^{-3/2} \dots\dots\dots (3)$$

(3)식은 Mie scattering을 고려한 phase function으로 Heny-Greenstein이 유도한 식으로  $\mu$ 와  $\omega_0$ 의 함수이며 물리적으로 산란 입자가 random하게 방향성을 갖는 의미이다. 여기서, 산란의 anisotropy에서 산란각의 평균 cosine는  $g$ 로 서술되는데  $g$ 가 1일때 forwardly 피크,  $g = 0$ 에서는 isotropy,  $g = -1$ 일때는 backwardly 피크의 산란상태를 의미한다.

Transport equation으로 부터 scattering coefficient 와 absorption coefficient를 계산하는 방법은 (1)식으로 부터 아래와 같이 유도할 수 있다[2].

$$I(r) = I_0(r)\exp(-\mu t d) \dots\dots\dots (4)$$

or  $\mu t = -(\ln I/I_0) / d$

위 식에서 attenuation coefficient,

$$\mu t = \mu_a + \mu_s \text{ 이고}$$

$d$  는 depth를 의미한다.

### 3. 결과 및 고찰

산란체인 intralipid의 분산계수를 결정하기 위해 intralipid의 농도 변화에 따라 산란되지 않은 빛의 양을 측정하였으며, added absorber technique[3]를 사용하여 전체 감쇠 계수( $\mu t = \rho \sigma t$ )는 산란 입자만 존재하기 때문에 scattering coefficient( $\mu_s$ )에 일치한다. 전체 감쇠 계수 측정은 single scattering만이 일어나도록 매우 묽은 농도에서 실험하였고, 산란되지 않고 나오는 광검출 각도를 작게 하기 위해 아이리스를 사용하였다. Fig. 3은 농도 변화에 따라 측정된 빛의 세기를 나타낸다. 이 값들은 10번을 재현성 있게 실험하여 평균한 값들이다.  $\mu_s$ 는 다음 식에 의해 계산되어진다.

$$I = I_0 \exp(-\mu_s c d) \dots\dots\dots (5)$$

여기에서  $c$ 는 농도를 뜻하고,  $d$ 는 cuvette의 직

경, I는 irradiance(W/m<sup>2</sup>), I0는 입사 irradiance를 뜻한다. 그러므로 scattering coefficient(μs)는

$$\mu_s = \frac{1}{d} \frac{\partial \ln(I/I_0)}{\partial C} \dots\dots\dots (6)$$

로 나타나며 Fig. 3에서 c vs ln(I/I0)의 기울기로부터 얻은 μs값은 Table 1과 같다. Table 1에서 농도가 묽을 수록 강한 쪽으로 투과가 일어나고, 반면 농도가 진할수록 산란에 의해 on-axis 강도가 크게 작아짐을 알 수 있다. 이는 농도가 진할수록 검출기에 닿는 비율이 적어짐을 뜻하는 데, 매질층이 두꺼울수록 산란이 증가함을 예상할 수 있었다. Table 2는 india ink의 농도가 증가함에 따라 흡광계수가 증가하여 산란세기가 감소함을 알 수 있다.

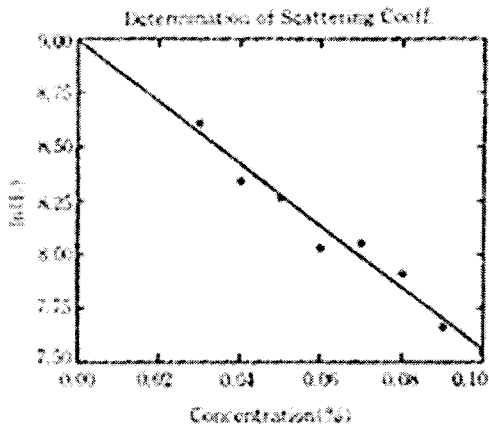


Fig. 3. Transmitted light as a function of the concentration of intralipid.

Table 1. Measured mean values of optical parameters of intralipid

species(conc)	I	μs(mm-1)
3 X 10 <sup>-2</sup>	5472.60	0.036
4 X 10 <sup>-2</sup>	4197.55	0.063
5 X 10 <sup>-2</sup>	3883.35	0.071
6 X 10 <sup>-2</sup>	3075.21	0.094
7 X 10 <sup>-2</sup>	3149.55	0.098
8 X 10 <sup>-2</sup>	2733.00	0.106
9 X 10 <sup>-2</sup>	2123.31	0.131
1 X 10 <sup>-1</sup>	1893.89	0.142

Table 2. Measured mean values of optical parameters of india ink

species(conc)	I	μa(mm <sup>-1</sup> )
2 X 10 <sup>-3</sup>	5688.19	0.015
3 X 10 <sup>-3</sup>	4319.84	0.043
4 X 10 <sup>-3</sup>	3673.26	0.059
5 X 10 <sup>-3</sup>	3468.61	0.065
6 X 10 <sup>-3</sup>	3039.21	0.078
7 X 10 <sup>-3</sup>	2586.94	0.094
8 X 10 <sup>-3</sup>	2369.33	0.103
9 X 10 <sup>-3</sup>	1968.69	0.121

혼탁물질에서 산란이나 형광세기가 매질의 농도에 미치는 영향을 조사한 결과 Fig.4 (a), (b), (c)를 분석, 광학 매개변수를 Table 3, 4, 5에 나타내었다. Fig. 4 (a), (b), (c)는 산란체인 intralipid, 형광체인 RA-6G와 흡수체인 india ink의 농도를 1%, 2%, 3%인 상태에서 조사한 산란 스펙트럼이다. 본 실험에서 처음으로 응용한 빛이 매질에 입사하여 침투깊이에 일치하는 위치에서 광자 축적에 따른 공간적 방사 fluence의 광자 확률 ρ는 아래 식 (7)로 나타낼 수가 있다.

$$\rho = (I \text{ wavelength} / \text{침투깊이}) \dots\dots\dots (7)$$

이는 (1)식으로 부터 다음 식을 유도했다.

$$I = I_0 \exp [-\mu_t \rho] \dots\dots\dots (8)$$

I · ρ는 매질의 침투깊이에서 광자의 공간적 방사 flux로 침투깊이와 파장에 대한 광자 세기와 상호 밀접한 관계가 있다고 사료된다.

Intralipid를 상온에서 농도별로 측정된 결과 농도가 증가함에 따라 산란 세기 [I(r)]가 증가하고, 산란 계수(μs)도 증가함을 알 수 있다. 실험 결과로부터 농도가 증가함에 따라 산란체인 intralipid의 입자들이 증가하여 광자가 광섬유에 닿는 확률이 증가함을 알 수 있다. 즉, 광자가 상호작용하여 매질의 농도가 큰쪽에서 MFP(Multi Function Printer/Product/Peripheral)가 작아짐으로 산란 입자들의 거리는 가까워 짐을 알 수 있다. Table 4는 형광체인 RA-6G에 대하여 저장 용액을 첨가하여 농도가 증가함 따라 I(r), μt가 감소하고 광침전에 따

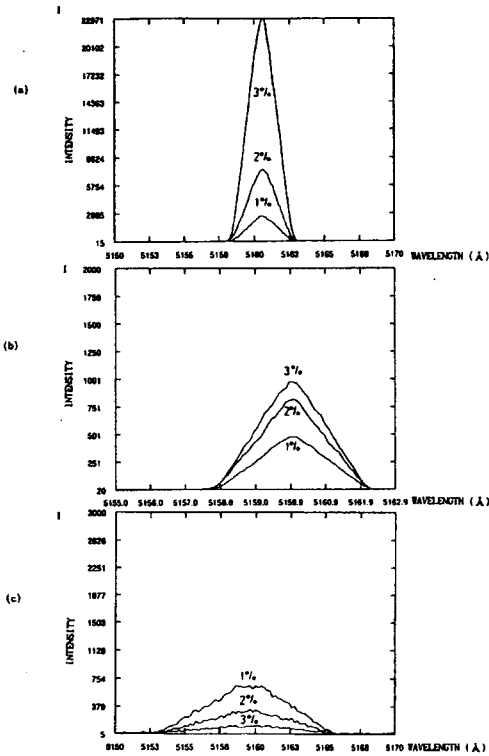


Fig. 4. The scattering spectra pattern of turbid material, with different concentrations(1%, 2%, 3% by volume) of (a): intralipid, (b): RA-6G, (c): india ink

른 공간적 방사 fluence,  $\rho$ 가 증가함을 알 수 있다. 반면 Table 3에서는  $\mu_a$ 가 증가하고  $\rho$ 값이 감소하였다. 이는 흡수체가 광자를 소멸시키므로 광학 특성에 미치는 영향이 크기 때문이다. Table 3, 4, 5에서 intralipid보다 india ink에서 회석 계수가 큰 이유는 흡수계수가 india ink에 크게 작용하기 때문이다[93, 105]. 형광체에서는 광자가 흡수되어 바닥 상태의 singlet에서 들뜬 singlet상태로 된 후 에너지가 방출되기 때문에 장파장으로 이동하고 에너지 크기는 감소하며 흡수 스펙트럼보다 머무는 시간이 길다. 따라서 회석계수가 산란체인 intralipid 보다는 빠르게, 흡수체(india ink) 보다는 완만하게 지수적으로 감소함을 확인 할 수 있다. 또한  $\rho$ 값은 광자 세기가 크면 비례적으로 크게 나타난다. 다음은 광학적 침투깊이( $v$ )를 나타낸 식이다.

$$v = 1/\mu_t \dots\dots\dots (9)$$

Intralipid, RA-6G, india ink의 가장 큰 세기를 가진 피크에서 회석 계수는 각각 13.54, 20.75, 21.72  $\text{cm}^{-1}$ 로써 그 들의  $v$ 값은 0.074, 0.048, 0.046인 데, intralipid와 RA-6G에서 광자 세기가 증가함에 따라 회석 계수가 감소하고, 침투 깊이의 위치에서 광자 축적에 따른 공간적 방사의 flux,  $\rho$ 가 증가함을 보이고 있으며, MFP ( $= 1 / \mu_t$ )는 광자 세기가 증가함에 따라 입자의 수도 비례한다. 이는 산란 입자간 거리가

Table 3. Measured mean values of the optical properties of Intralipid.

species, medium	I	$\mu_t$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$v$ (cm)	$\rho$
intralipid 1%	2885	18.31	0.055	$5.282 \times 10^4$
intralipid 2%	6954	16.29	0.161	$1.133 \times 10^5$
intralipid 3%	22971	13.54	0.174	$3.110 \times 10^5$

Table 4. Measured mean values of the optical properties of Rhodamine 6G.

species, medium	I	$\mu_t$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$v$ (cm)	$\rho$
RA - 6G 1%	501	22.35	0.045	$1.140 \times 10^3$
RA - 6G 2%	873	21.07	0.047	$1.839 \times 10^4$
RA - 6G 3%	1001	20.75	0.048	$2.077 \times 10^4$

Table 5. Measured mean values of the optical properties of India Ink.

species, medium	I	$\mu_t$ (cm <sup>-1</sup> )	$\nu$ (cm)	$\rho$
india ink 1%	657	21.72	0.046	1.427 X 10 <sup>4</sup>
india ink 2%	299	23.53	0.042	7.035 X 10 <sup>3</sup>
india ink 3%	86	26.40	0.038	2.270 X 10 <sup>3</sup>

가까워진 것으로 transport식으로 부터 확인되었다. 또한 Table 5에서 india ink의 경우는 added absorber technique[107]를 사용하여 전체 희석 계수( $\mu_t = \mu_a$ )는 흡수 입자만 존재하기 때문에 흡수 계수에 일치하고  $\mu_a$ 와  $\rho$ 값은 Table 3, 4와 비교하면 반대 현상이 나타남을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서 LIF에 의한 intralipid, Rhodamine 6G, india ink에 의한 광학적 파라미터를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산란매질에 빛이 입사하여 침투깊이에 일치하는 위치에서 광자 축적에 따른 공간적 방사 fluence의 광자 확률,  $\rho$ 를 Intralipid, Rhodamine 6G와 india ink에서 측정된 결과 Intralipid의 산란이 증가되었으며,  $\rho$ 값도 크게 나타났다.
2. Intralipid와 Rhodamine 6G를 상온에서 측정된 결과 농도가 증가함에 따라,  $\mu_s$  I(r)의 파라미터 값이 증가함에 따라 I(r)값도 비례하여 증가하였으며, india ink의 농도가 증가함에 따라  $\mu_s$ 가 증가하였으며, I(r)값은 비례하여 작게 나타났다.
3. Intralipid와 Rhodamine 6G의  $\nu$ 값은 각각의 농도가 증가함에 따라 증가하였으며, Intralipid값들이 Rhodamine 6G값보다 크게 나타난 것은 산란으로 인한 열침전이 큰 결과이다. India ink는 광자들이 흡광되기 때문에 농도가 증가함에 따라,  $\nu$ 값이 작게 나타났다.

#### 참고문헌

1. K. J. Kim and K. C. Sung, A Study on the Optical Influence by Photosensitizer in Vitro, J. of Korean Oil Chemist' Soc., 22(2), 182 (2005).
2. K. J. Kim and K. C. Sung, A Study on Spectra of Laser Induced Fluorescence in Phantom, J. of Korean Oil Chemist' Soc., 16(4), 329 (1999).
3. K. J. Kim and K. C. Sung, Monte Carlo Simulation on Light Distribution in Turbid Material, J. of Korean Oil Chemists Soc., 15(4), 11 (1998).
4. K. J. Kim and K. C. Sung, Studies on Measurements of Optical Parameters in Turbid Material by Light Scattering, J. of Korean Oil Chemists Soc., 12(2), 151 (1995).
5. S. L. Jacques and S. A. Prahl, Modeling Optical and Thermal Distribution in Tissue During Laser Irradiation, Laser in Surgery and Medicine 6, 494 (1987).
6. B. C. Wilson, Y. D. Park, Y. Hefetz, M. S. Patterson, S. J. Madsen and S. L. Jacques, The Potential of Time-resolved Reflectance Measurements for the Noninvasive Determination of Tissue Optical Properties, in Thermal and Optical Interactions with Biological and Related Composite Materials, M. J. Berry and G. M. Harpole, eds., Proc. S. P. I. E., p. 97, (1989).

7. S. L. Jacques, C. A. Alter, and S. A. Prahl, Angular Dependence of HeNe Laser Light Scattering by Human Dermis, *Laser in the Life Science*, 1(4), 309 (1987).
8. R. R. Alfano, G. C. Tang, A. Pradhan, W. Ran, S. J. Daniel, and E. Opher, Fluorescence Spectro from Cancerone and Normal Human Breast and Lung Tissues, *IEEE J. Quan. Elec. QE*, 23(10), 1806 (1987).
9. R. W. Henderson, G. S. Christie, P. S. Clenzy, and J. Lineham, Haematoporphyrin Diacetate: A Probe to Distinguish Malignant from Normal Tissue by Selective Fluorescence, *Br. J. Exp. Path.* 61, 345 (1980).
10. L. O. Poicard, C. J. Gomer, and A. E. Profio, Laser-Induced Hyperthermia of Ocular Tumors, *Appl. Opt.*, 28(12), 2318 (1989).
11. M. Winkelmann, B. Chance, and B. C. Wilson, Time Resolved Reflectance and Transmittance for the Noninvasive Measurement of Tissue Optical Properties, *Appl. Opt.*, 28(12), 2331 (1989).
12. K. Lee, I. J. Forbes, and W. H. Betts, Oxygen Dependency of Photocytotoxicity with Hematoporphyrin Derivative, *Photochem. Photobiol* 39(5), 631 (1984).
13. R. Hilf, P. B. Leakey, S. J. Soltt, and S. L. Gibson, Photodynamic Inactivation of R3230AC Mammary Carcinoma in vitro with HPD: Effects of Dose, Time and Serum on Uptake and Phototoxicity, *Photochem. Photobiol.* 37(6), 633 (1983).
14. H. Schnecknburger, M. Frenz, Y. Tsnchiya, U. Denzer, and L. Schleinkofer, Picosecond Fluorescence Microscopy for Measuring Chlorophyll and Porphyrin Components in Conifers and Cultured Cells, *Lasers in the Life Science* 1(4), 299 (1987).
15. A. A. Khan and M. Kasha, The Discovery of the Chemical Evolution of Singlet Oxygen, *International J. of Quantum Chem.* XXXIX, 251 (1991).
16. T. J. Dougherty, C. J. Gomer, and K. R. Weishaupt, Energetics and Efficiency of Photoinactivation of Murine Tumor Cells Containing Hematoporphyrin, *Cancer Research* 36, 2330 (1976).