

극초단 펄스레이저 광이 입사된 금속박막의 열적반응 중 비정상반사율의 영향

Effects of transient thermoreflectance on the thermal responses of metal thin film exposed to ultrashort laser heating

박 승 호*, 국 정 진**
S. H. Park, J. J. Kook

Key words: Metal thin-film(금속박막), Ultrashort pulse laser heating(극초단 펄스레이저 가열), Microscale heat transfer(미세열전달), Transient thermoreflectance(비정상 반사율), Complex dielectric constants(복소유전상수)

ABSTRACT

This work studies the effects of transient reflectances on the thermal responses of a metal (gold) thin-film during ultrashort laser heating. The heating process is calculated using the conventional conduction model (parabolic one-step: POS), parabolic two-step model (PTS) with and without variable properties, hyperbolic two-step model (HTS). Results from the HTS model are very similar to those from the PTS model, since the laser heating time in this study is greater than the electron relaxation time. PTS model with variable properties, however, results in totally different temperature profiles compared to those from POS models or calculation with constant properties. Transient reflectances are estimated from electron temperature distributions and based on the linear relationship between the electron temperature and complex dielectric constants. Reflectances of the front surface can be changed with respect to dielectric constants, while those of the rear surface remain unchanged.

기 호 설 명

<p>c : 빛의 속도 [m/s] C : 열용량 [$J/m^3 K$] G : 전자-격자 연결 인자 (electron-lattice coupling factor) [$W/m^3 K$] J : 레이저광의 강도 [J/m^2] k : 열전도계수 [$W/m K$] k_0 : 파동수 (wavenumber) [1/m]</p>	<p>L : 박막두께 [m] n : 복소굴절율의 실수부 q : 열유속 [W/m^2] R : 반사율 S : 복사열 흡수항 [W/m^3] t : 시간 [s] t_c : 전자열화시간 [s] t_p : 레이저 펄스 특성시간 [s] T : 온도 [K] v : 유전상수의 온도계수 x : x방향 좌표계</p>
--	---

* 정희원, 홍익대학교 기계공학과

** 홍익대학교 대학원

그리스 문자

- δ : 복사 투과 깊이 [m]
- ϵ : 유전상수
- χ : 복소굴절율의 허수부
- τ_F : 전자완화시간 [s]

하첨자

- 0 : 초기상태
- 1,2 : 실수부 및 허수부
- e : 전자
- l : 격자

1. 서론

약 30여 년 전에 개발된 레이저는 과학과 기술의 새로운 전개방향을 제시하고, 발전속도를 크게 증가시키고 있다. 특히, 각각의 에너지준위 및 공간적 또는 시간적 해상도를 정밀하게 보여줄 수 있어 새로운 현상 및 특이 과정을 제어할 수 있게 하였다. 예를 들면 비선형 광학현상, 레이저 이용 핵융합, 가스분자의 레이저냉각, 세포조직의 레이저 조작, 극초단 레이저 진단, 물질의 레이저 합성, 미소시스템의 제작 등을 들 수 있다. 이와 같은 기술들은 레이저의 고출력 및 극초단 펄스 등의 특징에 기반을 두고 있다.

현재 레이저의 출력은 10^{19} W/cm²에 달하고 조만간 10^{24} W/cm²의 출력을 기대하고 있다⁽¹⁾. 이와 같은 고출력 특성은 다양한 물질을 제조하게 하거나 매우 미약한 비선형 현상을 측정하는데 필수적이므로 이와 관련된 분야의 새로운 지평을 열게끔 하고 있다. 광학분야에 있어서 공간적인 해상도의 발전에 비하여 시간적인 해상도의 발전은 레이저의 발명이전에는 상당히 더디었으나 레이저가 개발된 이후에는 비약적으로 시간적인 해상도가 증가하고 있다. 레이저 펄스의 지속시간은 마이크로 초(microsecond: 10^{-6} s)에서 펨토 초(femtosecond: 10^{-15} s)까지 짧아져서 빛의 광학적 한계 또는 과거에는 관측하기 불가능한 극초단 현상을 이해하게 하고 있다.

이와 같은 극초단 펄스레이저가 금속표면에 입사될 경우 전자의 매우 빠른 동력학(ultrafast

dynamics)에 대한 연구가 최근에 상당히 진행되어 광자로부터 금속의 내부에너지로의 전환과정에 대한 물리적 해석을 가능토록 하였다. Kaganov 등⁽²⁾은 매우 빠르게 여기 상태에 도달한 전자는 전자완화시간(electron relaxation time)보다 짧은 시간동안에는 격자와 다른 온도를 가질 수 있음을 이론적으로 보였고, Eesley⁽³⁾ 및 Brorson 등⁽⁴⁾ 많은 연구자들이 실험적으로 확인하였다. 이에 대하여 Qui와 Tien⁽⁵⁾은 Boltzmann 수송방정식을 이용하여 전자전달 및 전자 - 격자(lattice)의 상호작용을 해석하였으며, Boltzmann 방정식의 산란 항을 양자역학적 해석을 통하여 단순화하였다. 이들은 당시까지 단지 현상적으로만 이해되는 극초단 현상을 엄밀히 해석할 수 있는 이론을 정립하였으며 이는 쌍곡선형 2단계모델(hyperbolic two-step: HTS)로 불리어진다.

HTS모델⁽⁵⁾은 레이저광으로부터의 광자가 격자 내부에너지로 변환되는 과정을 (1) 광자가 전자에 흡수되는 과정, (2) 흡수된 에너지가 전자 가스 사이에서의 전달과정 (3) 그리고 고 에너지 전자(hot electron)가 격자와의 충돌로 인하여 에너지를 격자에 전달하는 과정으로 구분할 수 있으며, 각각의 과정이 유한한 시간동안 진행됨을 설명하고 있다. 이는 기존의 거시적 모델인 Fourier 법칙을 기본으로 하는 포물선형 1단계 모델(parabolic one-step), 또는 포논(phonon 또는 lattice vibration)의 전달속도가 유한하다는 것으로부터 출발한 쌍곡선형 1단계 모델⁽⁶⁾(hyperbolic one-step)로는 설명할 수 없는 전자-격자의 상호작용을 설명할 수 있다.

HTS모델을 적용한 대부분의 연구는 금속박막의 반사율을 일정하다고 가정하였으나, 실제로는 온도가 10 K 변환 때 반사율은 $\Delta R \sim 10^{-4}$ 의 크기로 변한다⁽³⁾. 금속박막에 매우 강한 레이저광이 입사할 경우에는 전자의 온도가 수백 수천도 까지 상승하므로 반사율의 변동폭 ΔR 이 이에 비례하여 변화한다면 반사율의 변화는 박막에 흡수된 에너지의 양을 변화시킬 수 있어 이는 다시 전자의 온도를 변하게 할 수 있다. 많은 경우에 있어 금속박막의 역할은 반사경 등의 표면처리 재료로서 활용되고 있어 매우 높은 반사율을 가지고 있다. 전자온도상승에 의한 반사율 변화의 절대값은 반사율에 비하여 매우 작을 수 있으나

흡수율의 관점에서 보면 무시할 만큼 작지 않을 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 HTS모형을 이용하고, 또한 전자의 온도분포에 따른 박막에서의 반사율의 변화를 고려하여 박막의 열적 반응을 해석하는 것이다.

2. 해석모델 및 지배방정식

극초단 펄스레이저 광이 입사된 금속박막의 열적 반응을 해석하기 위한 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 본 연구에서의 해석대상은 매우 높은 반사율을 갖고 있어 반사경의 코팅재료로 널리 이용되는 두께 100 nm의 금 박막(gold thin-film)으로 하였다.

극초단 레이저 펄스 광에 대한 금속박막의 반응은 시간적으로 매우 짧고, 공간적으로 매우 작은 체적에 대한 현상이 지배를 하고 있기에 거시적 모델인 Fourier 법칙을 기본으로 하는 확산모델로는 설명하기 어렵다. 이를 설명할 수 있는 모델은 쌍곡선형 2단계 모델로 Qiu와 Tien⁽⁵⁾이 Boltzmann 수송방정식으로부터 유도하였고, 본 연구에서는 이를 적용하기로 한다. 또한, 금속박막의 두께 (약 0.1 μm 이하)나 짧은 시간에 레이저광이 침투하는 깊이 (10 ns에 약 1 μm)는 레이저광의 직경 (약 10 μm 이상)에 비하여 매우 작기 때문에 1차원적 해석이 가능케 하므로 다음과 같은 지배방정식을 사용할 수 있다.

$$C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} - G(T_e - T_l) + S \quad (1)$$

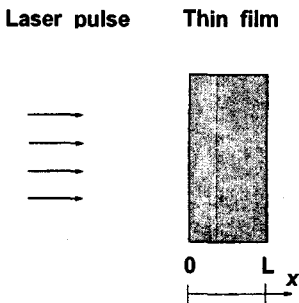


Fig. 1 Schematic diagram for ultra-short pulse laser heating of single metal layers.

$$C_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial t} = G(T_e - T_l) \quad (2)$$

$$\tau_F \frac{\partial q}{\partial t} + k(T_e, T_l) \frac{\partial T_e}{\partial x} + q = 0 \quad (3)$$

여기서 전자의 비열 C_e 는 온도에 선형적으로 비례하므로

$$C_e(T_e) = \frac{C_e^0 T_e}{T_l} \quad (4)$$

로 표현될 수 있고, 격자의 비열 C_l 은 Debye 온도보다 아주 낮은 범위에서는 온도의 3제곱에 비례하나, Debye 온도보다 높은 상온에서는 온도변화가 아주 크지 않을 경우에는 일정하다고 가정할 수 있다⁽⁷⁾. 열전달 현상이 파동적(wavy)인가 확산적(diffusive)인가를 지배하는 인자 중 하나인 전자완화시간(electron relaxation time) τ_F 는 Fermi 표면에서 계산되고 격자온도에 반비례하나 격자온도가 크게 변하지 않는 본 연구의 경우에는 일정하다고 가정할 수 있다. 전자의 열전달을 지배하는 열전도계수는 자유전자의 수, 전자완화시간, 전자온도에 비례하므로

$$k(T_e, T_l) = \frac{T_e}{T_l} k \quad (5)$$

로 단순화 될 수 있다⁽⁸⁾. 식(1)은 레이저광의 복사 에너지를 흡수하여 이를 확산에 의하여 열을 전달시키고, 또한 전자와 포논과의 에너지교환과정을 설명한다. 식(2)는 전자로부터 받은 에너지를 격자가 흡수하는 과정을 설명하고 있으나 이 경우 격자에 의한 확산은 전자에 의한 확산보다 훨씬 작기에 포함되지 않았다. 식(3)은 포논의 전파에 의하여 설명되는 거시적 열적 파동모델^(9,10)과 달리 전자가스에 의하여 전파되는 미시적 파동 열전달 모델이다.

식(1)에서의 레이저광 흡수항은 S는 흡수되는 복사열이 각각의 위치 x 에서 공간적으로 균일하고, 그리고 시간에 대한 형태는 Gaussian으로 가정하면

$$S = 0.94 \frac{1-R}{t_p \delta} J \cdot \exp \left[-\frac{x}{\delta} - 2.77 \left(\frac{t-2t_p}{t_p} \right)^2 \right] \quad (6)$$

으로 단순화 된다⁽⁸⁾. 여기서 R 은 박막에서의 반사율을, t_p 는 펄스의 특성지속시간(full-width-half-maximum: FWHM)을, δ 는 레이저광의 투과 깊이를, J 는 레이저광의 강도(fluence) 나타낸다.

본 연구의 목적이 비정상 반사율 효과를 해석하는 것이므로 식(6)에서의 반사율 R 을 다른 연구에서와 같이 일정한 상수로 취급할 수 없다. 투과율 또는 반사율 등 복사 물성치는 복소 유전상수(complex dielectric constant)의 함수이므로 해석대상의 유전상수를 알아야만 한다. 금속의 유전상수는 온도의 함수이고 다음과 같이 선형화될 수 있다⁽¹¹⁾.

$$\epsilon = \epsilon_1(1 + v_1 T) + i\epsilon_2(1 + v_2 T) \quad (7)$$

그리고 레이저 광이 입사한 후부터 막박의 온도가 증가하게 되는데 식(6)의 x/δ 에 의하여 박막에서의 온도가 x 방향으로 균일하지 않다. 이와 같이 온도가 불균일한 매체의 반사율 변화폭⁽¹¹⁾은

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} = & 4\{[(n^2 - x^2 - 1)I_2 - 2xnI_1]\epsilon_1 v_1 \\ & + [(n^2 - x^2 - 1)I_1 + 2xnI_2]\epsilon_2 v_2\} \\ & / [(n+1)^2 + x^2][(n-1)^2 + x^2] \end{aligned} \quad (8)$$

이고, 여기서

$$\epsilon_1 = n^2 - x^2 \quad (9)$$

$$\epsilon_2 = 2xn \quad (10)$$

$$I_1 = k_o \int_0^\infty T(x') \exp(-2k_o xx') \cos(2k_o nx') dx' \quad (11)$$

$$I_2 = k_o \int_0^\infty T(x') \exp(-2k_o xx') \sin(2k_o nx') dx' \quad (12)$$

이다. 여기서 $k_o = \omega/c$ 는 입사광의 진공 속에서의 파동수(wave number)이다. 전자와 격자시스템의 초기조건 및 경계조건은

$$T_e(x, 0) = T_l(x, 0) = T_o \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T_e}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{\partial T_l}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T_l}{\partial x} \Big|_{x=L} \quad (14)$$

이고, 여기서 펄스레이저의 가열시간동안 박막의 앞뒷면으로부터의 열 손실이 없다고 가정하였다.

위 식들의 비선형성 때문에 해석해를 구하는 것은 거의 불가능하므로 수치적인 방법으로 문제를 해석하였다. 시간에 대하여는 Crank-Nicholson법을 이용하였고, 공간에 대하여는 중심차분법을 사용하였다. 비선형성을 해결하기 위하여 전자 및 격자온도에 대하여 매 시간구간에서 수렴할 때까지 반복계산하였고, 수렴기준은

$$\Delta T_e / T_e < 10^{-4} \text{ 이고, } \Delta T_l / T_l < 10^{-5} \text{으로}$$

하였다. 그리고 $x=0$ 에 집중되는 불균일 격자시스템을 사용하였으며 격자 수는 301이었다. 또한 매 시간구간에서 흡수되는 에너지와 전자 및 격자의 총 에너지 상승을 비교하여 그 차이가 0.1% 안에 있도록 하였다.

금 박막의 물성치 및 계산에 사용된 변수는 Table 1에 제시하였다. 유전상수의 온도계수(앞으로 유전계수라 함) 식(7)의 v_1, v_2 를 제외하고는 실제적인 값이다^(8, 12). 그러나 유전계수는 정확하게 측정된 값이 없기에 일정 범위 안의 값을 사용하였다. 그러나 유전계수는 약 $\pm 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 이내로 알려져 있다^(13, 14).

3. 결과 및 고찰

펄스 레이저에 대한 금속의 열적반응은 특성시간에 따라 현상이 크게 달라지고, 각각의 특성에 따라 단순화가 가능하다. 본 현상을 지배하는 특성시간을 정리하면 ① 레이저 광의 펄스지속시간 t_p , ② 전자완화시간(electron relaxation time) τ_F , ③ 전자-격자 열화시간(electron-lattice thermalization time) $t_c = C_e/G$ 가 있다.

Table 1에 제시된 변수 값을 이용하여 특성시간을 비교하면

$$t_c > t_p > \tau_F \quad (15)$$

가 됨을 알 수 있다. 여기서 가열시간인 펄스지속시간보다 전자-격자 열화시간이 길기에 1단계

Table 1 Physical properties in this study^(8, 12)

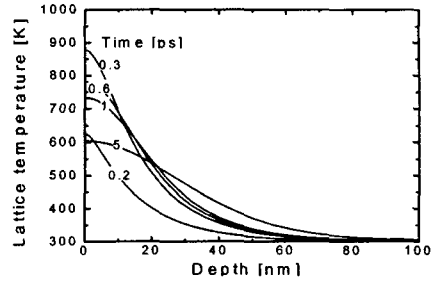
Parameters	Estimated values
T_o	300 K
k	315 W/m K
C_l	2.5×10^6 J/m ³ K
C_{eo}	2.1×10^4 J/m ³ K
G	2.6×10^{10} W/m ³ K
L	100 nm
J	500 J/m ²
t_p	0.1 ps
δ	15.3 nm
τ_F	0.04 ps
λ	50.653 μ m
$m = n + ix$	0.166 + 3.15 i
v_1, v_2	$-1 \times 10^{-3} < v_1, v_2 < 1 \times 10^{-3}$ K ⁻¹

(one-step) 모델보다는 2단계 (two-step) 모델이 적용이 되어야 함을 예상할 수 있다. 만약 전자-격자 연결인자 G 가 매우 커서, t_c 가 펄스 지속시간 보다 매우 작을 경우에는 전자로부터 격자로의 열전달 시간이 매우 짧게 되어 전자온도와 격자온도간의 차이가 없는 일반적인 1단계모델이 되고, 전자완화시간이 상대적으로 길 경우에는 열전달의 파동성을 고려하는 쌍곡선형 방정식을 해석하여야 한다. 각각의 특성시간의 길이에 따라 발생하는 현상의 특성은 참고문헌 (8)에 자세히 설명되어 있다.

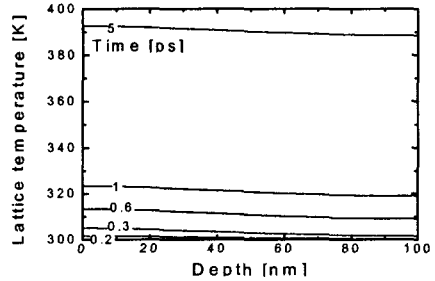
Fig. 2는 전자완화시간을 고려하지 않은 경우에 대한 1단계모델(parabolic one-step: POS)과 2단계모델(parabolic two-step: PTS)로부터의 해석결과를 보여준다. POS 모델의 결과는 Fig. 2(a)에 나타나 있는데 시간의 흐름에 따라 펄스의 강도가 달라지고, 펄스의 강도에 따라 온도가 상승하였다 하강하는 모습을 보인다. 여기서 박막의 표면부근의 온도는 급격히 증가하나 뒷면의 온도는 5 ps정도가 지나더라도 크게 상승되지 않음을 보인다.

Figs. 2(b)(c)는 PTS모델을 사용한 경우에 격자 및 전자의 온도변화를 보여준다. 전자의 온도는 초기에는 표면이 후면보다 훨씬 높으나 일정 시간이 흐른 뒤에는 균일한 온도분포를 보인다.

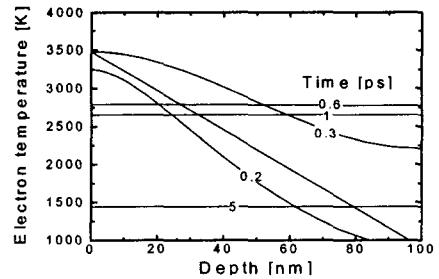
POS모델에서는 열확산계수가 $k/(C_e + C_l)$ 이나, PTS모델에서는 열확산계수가 k/C_e 이므로



(a) Parabolic one-step model



(b) Parabolic two-step model



(c) Parabolic Two-Step Model

Fig. 2 Temperature profiles in a 100 nm thick gold film during 0.1 ps laser pulse heating ($J = 500$ J/m²).

PTS모델이 열확산율이 훨씬 높다. 따라서, 전자들 간의 열확산이 원활해져서 쉽게 균일한 온도 분포를 보이고 있다. 시간이 점차 흐름에 따라 전자가 흡수한 레이저 에너지는 전자-격자 연결인자(electron - lattice coupling factor: G)를 통하여 격자로 이송이 되기 때문에 격자의 온도는 계속 높아짐을 Fig. 2(b)에서 확인할 수 있다. 또한 PTS모델로부터의 격자의 온도는 POS모델로부터의 온도보다 균일하고, 후면까지 열이 신속

하게 전달됨을 알 수 있다. 따라서 극초단 펄스 레이저를 사용한 경우에는 열확산 영역이 크게 확대될 수 있으나, 격자온도는 기존의 확산 방정식으로부터 예측한 온도보다 훨씬 낮은 온도를 나타내므로, 펄스 레이저를 이용한 미소시스템의 제작시 이와 같은 성질을 파악하고 있어야 한다.

Fig. 3은 식(7)의 유전계수를 0이라 가정한 후 POS모델 (실선), PTS모델 (쇄선), HTS모델 (일점쇄선)로부터의 시간에 따른 최고 온도의 변화를 보여준다. 또한, 점선은 PTS 모델을 사용하였는데 모든 물성치가 온도에 의존하지 않고 일정하다고 가정하여 계산한 값이다. 우선 일정 물성치의 가정이 크게 잘못 되었음을 보인다. 특히, 이 경우 전자의 비열의 온도 의존성을 무시했기 때문에 과도한 온도상승을 예측하고 있다. POS 모델로부터의 결과는 Fig. 2(a)에서 예측할 수 있듯이 다른 모델로부터의 결과보다 훨씬 낮은 온도를 보이고 있다. 레이저 광을 흡수하는 순간에 전자 및 격자에 에너지가 흡수되기 때문에 전자 및 격자의 열용량을 동시에 고려하기 때문이다. PTS모델과 HTS모델로부터의 계산 결과는 크게 다르지 않다. 이는 전자완화시간이 가열시간보다 짧기 때문에 과동성이 크게 나타나지 않았기 때문이다. 따라서, 본 연구에서의 해석 대상은 PTS 모델이나 HTS모델이나 거의 동일한 결과를 가져오기에 HTS모델로 해석모델을 선정하였다.

Figs. 2-3에서 나타나듯이 격자의 온도는 크게 증가하지 않으나 전자의 온도는 크게 증가하므로 전자의 온도에 의존하는 복사 물성치의 값이 변할 수 있으리라 예상할 수 있다. 앞선 대부분의 연구에서는 이를 무시하였지만 본 연구에서는 보다 자세히 고찰하고자 한다. 이는 많은 경우에 있어서 표면처리재료는 반사율이 0.9 이상의 매우 높은 재질을 사용하므로 온도변화에 따른

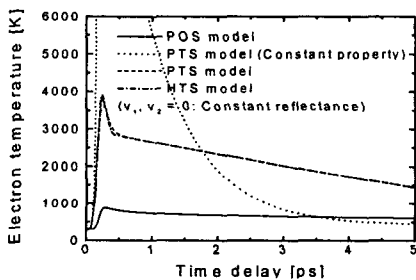


Fig. 3 Comparison of laser heating models.

반사율의 증가는 상대적으로 매우 작을 수 있다. 그러나 흡수되는 양은 흡수율 ($A=1-R-T$)에 의존하므로 반사율이 조금 변하더라도 흡수율의 상대적 변화는 작지 않을 수 있다.

Fig. 4는 반사율의 온도의존성을 지배하는 유전계수에 따른 박막최대온도의 시간적 변화를 보여준다. 유전계수가 일반적 범위인 $\pm 10^{-4} K^{-1}$ 에서는 변화폭이 약 10%임을 보이나, 그 이상이 되면 상당히 많은 온도차를 나타내고 있다. 유전계수에 따른 온도변화는 반사율이 온도에 달라지기 때문이고, 이를 Fig. 5에 나타내었다.

이때, 유전계수의 정확한 값을 알 수 없기에 v_1 과 v_2 를 같은 값으로 설정하였다. 유전계수의 부호가 음이면 반사율이 줄어들어 박막에 흡수되는 에너지가 많아지고, 반대로 양이면 반사율이 증가하여 박막에 흡수되는 에너지가 작아지게 되어 상대적으로 낮은 온도 상승을 나타낸다.

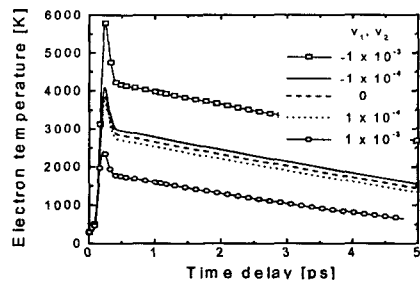


Fig. 4 Comparison of temperature profiles using HTS model for various coefficients of the complex dielectric constant.

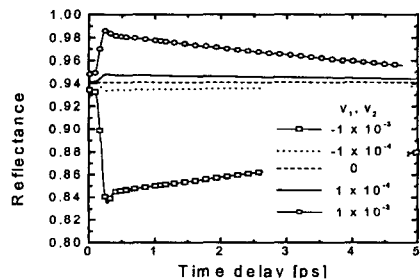
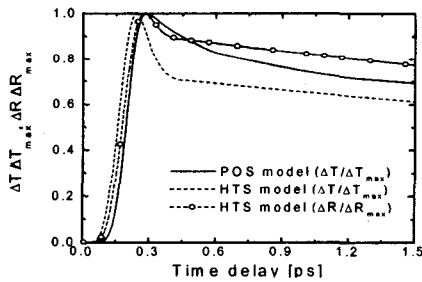


Fig. 5 Comparison of reflectances at $x = 0$ using HTS model for various coefficients of the complex dielectric constant.

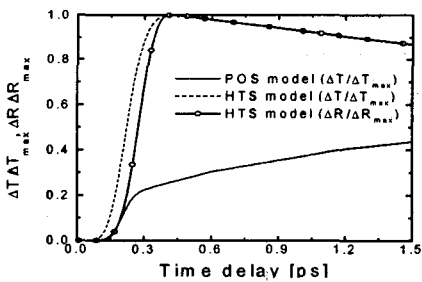
전자-격자의 열화시간 t_c 가 유한하다는 가정으로부터 2단계모델이 출발하였는데, 이를 증명하는 방법중의 하나는 반사율을 측정하는 것이었다. 레이저광이 입사한 후 약 일, 이백 fs후에 전자는 통계학적 열평형에 도달하게 되고, 이때부터 전자의 온도는 의미가 있게 된다. 그리고 전자 온도변화와 반사율의 변화는 아래와 같이 대략적으로 비례함을 여러 실험으로부터 증명되었다^(15, 16).

$$\frac{\Delta T_e}{(\Delta T_e)_{\max}} \cong \frac{\Delta R_e}{(\Delta R_e)_{\max}} \quad (16)$$

여기서 하첨자 “max”는 가열과정동안 일어나는 최대 변화폭을 의미한다. Fig. 6 (a)는 레이저광이 입사하는 전면 ($x=0$)에서의 온도 및 반사율의 상대적 변화폭을 보여주고 있다. 일반적으로 온도의 증가 및 감소에 따라, 반사율도 각각 증가



(a) at $x = 0$



(b) at $x = L$

Fig. 6 Thermal responses and reflectances of single layer metal films during a 0.1 ps laser pulse heating.

및 감소함을 보여준다. 반사율의 변화는 초기에는 POS모델의 온도변화와 유사하게 변화다 나중에는 HTS모델의 온도변화에 접근함을 보인다. 이 그림으로서 특별히 POS모델의 부적절함을 파악할 수 없다. 그러나, Fig. 6(b)는 레이저광에 대하여 뒷면 ($x=L$)의 온도 및 반사율의 변화를 보여주고, POS모델과 HTS모델과의 차이를 극명하게 보여준다. POS모델로부터의 뒷면온도는 시간에 따라 지속적으로 상승하고 있으나 HTS모델의 온도는 초기에 급격히 상승하였으나 일정시간이 흐른 후 감소하고 있고, 또한 반사율도 마찬가지로 HTS모델의 결과와 유사한 변화를 보여준다. 이와 같은 현상은 여러 실험에서 확인이 된 바 있다^(4, 5, 17).

Fig. 7은 유전계수의 변화 따라 레이저광이 입사하는 전면에서의 온도 및 반사율의 상대적 변화를 보여준다. 유전계수의 따라 온도 변화는 거의 차이가 없음을 보이나, 반사율은 상당히 차이가 있음을 알 수 있다. 여러 유전계수 값에 대하여 반사율의 변화를 계산하였으나 대표적인 값만 제시하였다. 실험적으로 측정된 값⁽⁴⁾ (다이아몬드 표식), 계산된 온도변화 및 계산된 반사율과 비교할 때 유전계수 $v_1=0, v_2=-5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 일 때(정사각형 표식)가 가장 잘 일치하였다. 이는 이와 같이하여 불확실한 유전계수를 구할 수도 있음을 보인 예이다. 그러나, 이는 정성적인 경향만 일치함을 의미하고, 정량적인 값과는 아직도 상당한 거리가 있어 보다 심도 깊은 연구가 요구된다. 유전계수가 $v_1 = v_2 = 0$ 의 경우는 유전 상

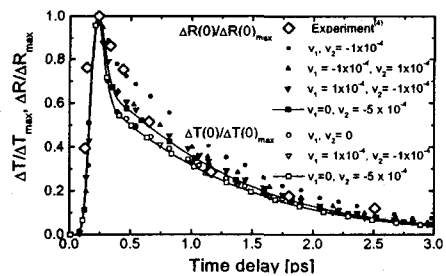


Fig. 7 Thermal responses and reflectances at $x = 0$ for various coefficients of the complex dielectric constant during 96 fs laser pulse heating ($J = 10 \text{ J/m}^2$).

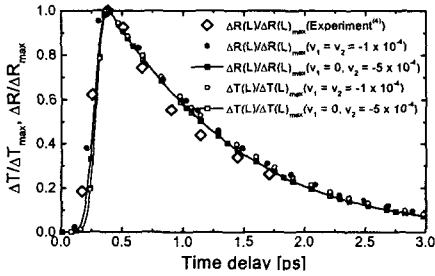


Fig. 8 Thermal responses and reflectances at $x = L$ during 96 fs laser pulse heating ($J = 10 \text{ J/m}^2$).

상수가 일정하다고 가정한 경우의 온도변화이다. Qui와 Tien⁽¹⁸⁾은 반사율의 비가 온도 변화비와 같다고 가정하여, 즉 식(16)을 사용하여 간접적으로 예측하였다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 선택된 유전계수의 값으로 후면에서의 온도변화 및 반사율의 변화를 나타내고 있는데 반사율과 온도의 변화비가 거의 일치하고 있다. 또한 유전계수를 여러 가지로 변화시켜도 거의 유사한 값을 나타내기에 대표적인 값만 표시하였다. 이 해석결과는 Brorson 등⁽⁴⁾의 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 금속박막(금박막)에 입사한 극초단 펄스레이저광의 에너지 전달 과정을 쌍곡선형 2단계모델 (HTS)로 해석하였다.

기존의 Fourier 법칙을 기본으로 하는 확산모델인 POS모델, 전자완화시간이 무한히 작다고 가정한 PTS모델, 그리고 현재까지 모델 중 가장 엄밀한 해석모델인 HTS모델을 비교하였다.

금박막의 전자완화시간이 펄스 레이저 가열시간보다 상대적으로 짧은 경우에는 HTS와 PTS 모델의 결과는 매우 유사하였다. 그러나, 이들은 POS모델 또는 일정 물성치를 사용한 PTS모델과는 전혀 다른 온도분포를 나타내고 있다.

금속박막의 유전상수를 전자온도의 함수로 표현하고, 이로써 박막의 반사율을 예측할 수 있는 공식을 이용하여 전자의 온도변화를 계산하였다. 일반적인 범위에서의 유전계수에 따른 최고온도는 최대 10% 정도의 변화를 나타냈으나, 이 범위를 벗어나는 경우에는 상당한 오차를 가질 수 있

음을 보였다. 그리고, 반사율을 예측하여 실험 결과와 비교하였는데, 레이저가 입사한 전면의 반사율의 상대적 변화는 유전계수에 의하여 달라지나, 후면에서의 반사율 변화는 큰 차이가 없었다.

현재까지의 해석모델은 레이저광으로부터 광자가 흡수되는 과정을 단순화하여 광자가 전자에 도달하는 동시에 흡수된다고 가정하였으나, 이 과정은 앞으로의 연구과제라 할 수 있다.

후 기

본 연구는 정보통신부에서 지원하는 '98년도 대학기초연구지원사업에 의하여 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Akhmanov, S. A., Vysloukh, V.A. and Chirkin, A. S., 1992, Optics of Femtosecond Laser Pulses, American Institute of Physics, New York.
2. Kaganov, M. I., Lifshitz, I. M., and Tanatarov, M. V., 1957, Relaxation between Electrons and Crystalline Lattices, Soviet Physics JETP, Vol. 4, pp. 173-178.
3. Eesley, G. L., 1983, Observation of Non-equilibrium Electron Heating in Copper, Phys. Rev. Lett., Vol. 51, pp. 2140-2143.
4. Brorson, S. D., Fujimoto, J. G., Ippen, E. P., 1987, Femtosecond Electron Heat-Transfer Dynamics in Thin Gold Film, Physical Review Letter, Vol. 59, pp. 1962-1965.
5. Qiu, T. Q. and Tien, C. L., 1993, Heat Transfer Mechanisms during Short-Pulse Laser Heating of Metals, J. Heat Transfer, Vol. 115, pp. 835-841.
6. Tzou, D. Y., 1992, Thermal Shock Phenomena under High Rate Response in Solids, Annual Review of Heat Transfer, C.L. Tien, ed., Hemisphere Publishing Corporation, Washington, Vol. IV, pp. 111-185.
7. Tien, C. L. and Lienhard, J. H., 1979, Statistical Thermodynamics, Hemisphere

- Publishing Corporation, New York.
8. Qiu, T. Q. and Tien, C. L., 1994, Femtosecond Laser Heating of Multi-Layer Metals-I, Analysis, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 2789-2797.
 9. Cattaneo, C., 1958, A Form of Heat Conduction Equation Which Eliminates the Paradox of Instantaneous Propagation, *Compte Rendus*, Vol. 247, pp. 431-433.
 10. Vernotte, P., 1961, Some Possible Complications in the Phenomena of Thermal Conduction, *Compte Rendus*, Vol. 252, pp. 2190-2191.
 11. Lorincz, A., Bozoki, Z., and Miklos, A., 1991, Comments on Electron Relaxation Time Measurements from Transient Reflectances of Metals, *J. Appl. Phys.* Vol. 70, pp. 941-947.
 12. Brewster, M. Q., 1992, *Thermal Radiative Transfer and Properties*, John Wiley & Sons, Inc.
 13. Scouler, W. J., 1967, Temperature - Modulated Reflectance of Gold from 2 to 10 eV, *Physics Review Letters*, Vol. 18, pp. 445-448.
 14. Miklos, A., and Lorincz, A. 1988, Transient Thermorefectance of Thin Metal Films in the Picosecond Regime, *J. Appl. Phys.* Vol. 63, pp. 2391-2395.
 15. Rosei, R. and Lynch, D. W., 1972, Thermomodulation Spectra of Al, Au and Cu, *Phy. Rev. B*, Vol. 5, pp. 3883-3893.
 16. Juhasz, T., Elsayed-Ali, H. E., Hu, X. H., and Bron, W. E., 1992, Time-Resolved Thermorefectivity of Thin Gold Films and Its Dependence on the Ambient Temperature, *Phy. Rev. B*, Vol. 45, pp. 13819-18822.
 17. Qui, T. Q., Juhasz, T., Suarez, C., Bron, W. E., and Tien, C. L., 1994, Femtosecond Laser Heating of Multi-Layered Metals-II. Experiments, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 2799-2808.
 18. Qui, T. and Tien, C.L., 1992, Short-Pulse Laser Heating on Metals, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 719-726.