

激光斜入射对薄膜光学特性影响的数值分析

贺敏波 江厚满 陈敏孙 袁 春

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对斜入射激光辐照光学薄膜的情况,将激光的电矢量正交分解为 s 偏振和 p 偏振,并从麦克斯韦方程组出发,求得激光在膜层中传输的电磁场分布,进而对薄膜的光学特性进行了数值分析。以高反膜为例,结果表明:随着入射角的增大,s 偏振光的反射率、透射率和吸收率有微小的浮动;而 p 偏振光的反射率、透射率和吸收率有明显的变化,其反射率逐渐减小,透射率和吸收率逐渐增大;在高反膜中心波长附近,s 偏振光和 p 偏振光均有一高反宽带,与 s 偏振光相比,p 偏振光的宽带明显变窄,且 p 偏振光的吸收率相对较高。

关键词 薄膜;斜入射;s 偏振;p 偏振

中图分类号 O484.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100114

Numerical Analysis of Optical Properties under Oblique Incidence of Laser in Optical Thin Films

He Minbo Jiang Houman Chen Minsun Yuan Chun

(College of Photon-Electron and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Considering optical thin films irradiated by laser at oblique incidence, the electric vector is orthogonally decomposed into s-polarization and p-polarization. And based on the Maxwell equations, electromagnetic-field distribution in optical thin films is obtained. Then the optical properties of optical thin films are numerically analyzed. The results about high-reflection thin film show some features as follows. With the increase of the angle of incidence, the reflectance, transmittance and absorptivity of s-polarized light have tiny fluctuations. But for p-polarized light, obviously, the reflectance shows gradually decrease while the transmittance and absorptivity are opposite. And near the central wavelength in high-reflection thin film, both s-polarized light and p-polarized light have a high-reflectance broadband. Compared with s-polarized light, the broadband for p-polarized light is manifestly narrower and the absorptivity is relatively higher.

Key words thin films; oblique incidence; s-polarization; p-polarization

OCIS codes 140.3330; 310.5448; 310.6860

1 引 言

以往在研究激光辐照光学薄膜时,均假设激光垂直辐照光学薄膜^[1~6]。由于垂直入射时入射面具有任意性,因此没有 s 偏振光和 p 偏振光可言。然而在实际中,辐照光学薄膜时激光都是有角度入射的,此时依据入射面,激光可分为 s 偏振光和 p 偏振光。但由于 s 偏振光和 p 偏振光的不同特性,可能导致薄膜的光学特性呈现出些许差异。对高能激光

而言,微小的差异都有可能導致光学薄膜的损伤。因此本文针对激光有角度入射情况,分别研究了 s 偏振光和 p 偏振光下光学薄膜的光学特性。

2 理论分析

激光辐照多层膜时,激光的传输可以简化为单色平面波在多层膜中的传输,并在膜层中形成驻波场^[7]。而激光作为一种电磁波,同样满足麦克斯韦

收稿日期: 2011-01-18; **收到修改稿日期**: 2011-02-18

作者简介: 贺敏波(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: hmb203@gmail.com

导师简介: 江厚满(1970—),男,副教授,主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。E-mail: jhm3395@sina.com

方程组^[8]:

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \bar{n}^2 \mathbf{E} = 0 \\ \mathbf{H} = \frac{i}{\omega \mu} \nabla \times \mathbf{E} \end{cases} \quad \text{or} \quad \begin{cases} \nabla^2 \mathbf{H} + k_0^2 \bar{n}^2 \mathbf{H} = 0 \\ \mathbf{E} = \frac{1}{i\omega \epsilon} \nabla \times \mathbf{H} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, ω 为激光圆频率, ϵ_0 和 μ_0 分别为真空中的介电常数和磁导率, \bar{n} 为介质的复折射率, ϵ 和 μ 分别为介质中的介电常数和磁导率。

假设入射激光为一线偏振光, 依据入射面, 可将激光的电矢量进行正交分解, 电矢量振动方向垂直入射平面的分量为 s 偏振分量, 电矢量振动方向平行于入射平面的分量为 p 偏振分量。由于 s 偏振分量和 p 偏振分量在介质突变处的边界条件是相互独立的, 所以这两种波相互独立^[9]。因此本文将对 s 偏振光和 p 偏振光分别单独考虑。如图 1 所示, 入射平面是 $yo z$ 平面, x 轴垂直于入射平面向里。激光入射角为 θ_0 , 入射介质为空气^[10]。

2.1 s 偏振光

对于 s 偏振光, 电矢量只有 x 分量不为 0, 即

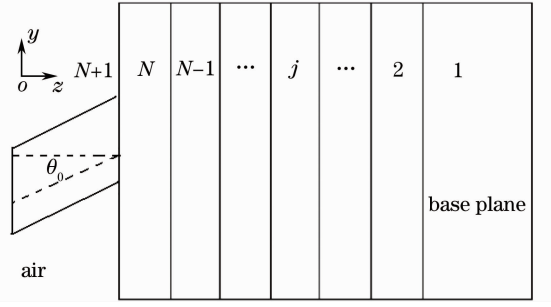


图 1 连续激光辐照多层膜模型

Fig. 1 Model of optical multilayer thin films irradiated by continuous-wave laser

$\mathbf{E} = (E_x, 0, 0)$ 。考虑到沿 x 方向介质是无限均匀的, 则 E_x 与 x 坐标无关。代入(1)式中的前者, 可以得到

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k_0^2 \bar{n}^2 E_x = 0 \\ H_x = 0, \frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega \mu H_y, \frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega \mu H_z \end{cases}. \quad (2)$$

通过对(2)式的求解, 最终得出 s 偏振光的电磁场分布通解

$$\begin{cases} E_x(y, z) = A_1 [\exp(-ik_0 \bar{n} z \cos \theta) + A_2 \exp(ik_0 \bar{n} z \cos \theta)] \exp(-ik_0 \bar{n} y \sin \theta) \\ H_y(y, z) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \bar{n} \cos \theta A_1 [\exp(-ik_0 \bar{n} z \cos \theta) - A_2 \exp(ik_0 \bar{n} z \cos \theta)] \exp(-ik_0 \bar{n} y \sin \theta) \\ H_z(y, z) = -\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \bar{n} \sin \theta A_1 [\exp(-ik_0 \bar{n} z \cos \theta) + A_2 \exp(ik_0 \bar{n} z \cos \theta)] \exp(-ik_0 \bar{n} y \sin \theta) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 A_1 和 A_2 分别为常系数, 对于不同的膜层其系数不同。而根据电磁场边界条件, 即电场和磁场的切向连续性, 通过推导可以得出

$$\begin{cases} A_2^j = \frac{(\bar{n}^j \cos \theta_j - \bar{n}^{j-1} \cos \theta_{j-1}) / (\bar{n}^j \cos \theta_j + \bar{n}^{j-1} \cos \theta_{j-1}) + A_2^{j-1}}{1 + [(\bar{n}^j \cos \theta_j - \bar{n}^{j-1} \cos \theta_{j-1}) / (\bar{n}^j \cos \theta_j + \bar{n}^{j-1} \cos \theta_{j-1})] A_2^{j-1}} \exp(-i2k_0 \bar{n}^j z_j \cos \theta_j), \\ A_1^j = \frac{[\exp(-ik_0 \bar{n}^{j+1} z_{j+1} \cos \theta_{j+1}) + A_2^{j+1} \exp(ik_0 \bar{n}^{j+1} z_{j+1} \cos \theta_{j+1})]}{1 + A_2^j} A_1^{j+1}, \end{cases} \quad (2 \leq j \leq N+1), \quad (4)$$

式中 j 代表第 j 层膜。由于基底没有反射波, 故 $A_2^1 = 0$ 。对于 $j = N+1$, 由于 A_1^{N+1} 是入射激光电场振幅, 为方便起见, 取 $A_1^{N+1} = 1$ 。最终通过(4)式可以求解出每层膜中的 A_1^j 和 A_2^j 。

那么 s 偏振光的电场振幅透射系数和振幅反射系数可以写为

$$t = \frac{A_1^1}{A_1^{N+1}}, \quad r = A_2^{N+1}, \quad (5)$$

由于光学薄膜中的能流大小取决于坡印亭矢量 \mathbf{z} 的大小, 即 $S = 0.5 \text{Re}[\mathbf{E}_x \times \mathbf{H}_y^*]$, 所以光学薄膜中 s 偏振光的透射率和反射率分别为

$$\begin{cases} T = \frac{n_g \cos \theta_g |A_1^1|^2}{n_0 \cos \theta_0 |A_1^{N+1}|^2} = \frac{n_g \cos \theta_g}{n_0 \cos \theta_0} |t|^2 \\ R = |A_2^{N+1}|^2 = |r|^2 \end{cases}, \quad (6)$$

显然, 薄膜对激光的吸收率可写为 $\alpha = 1 - R - T$ 。

2.2 p 偏振光

对于 p 偏振光, 磁矢量只有 x 分量不为 0, 即 $\mathbf{H} = (H_x, 0, 0)$, 且 H_x 与 x 坐标无关。代入(1)式中的后者, 可以得到

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} + k_0^2 \bar{n}^2 H_x = 0 \\ E_x = 0, \frac{\partial H_x}{\partial z} = i\omega \epsilon E_y, \frac{\partial H_x}{\partial y} = -i\omega \epsilon E_z \end{cases}. \quad (7)$$

通过对(7)式的求解,最终得出 p 偏振光的电磁场分布通解为

$$\begin{cases} H_x(y, z) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \bar{n} B_1 [\exp(-ik_0 \bar{n} z \cos \theta) + B_2 \exp(ik_0 \bar{n} z \cos \theta)] \exp(-ik_0 \bar{n} y \sin \theta) \\ E_y(y, z) = -\cos \theta B_1 [\exp(-ik_0 \bar{n} z \cos \theta) - B_2 \exp(ik_0 \bar{n} z \cos \theta)] \exp(-ik_0 \bar{n} y \sin \theta) \\ E_z(y, z) = \sin \theta B_1 [\exp(-ik_0 \bar{n} z \cos \theta) + B_2 \exp(ik_0 \bar{n} z \cos \theta)] \exp(-ik_0 \bar{n} y \sin \theta) \end{cases} \quad (8)$$

同样,式中的 B_1 和 B_2 分别为常系数,对于不同的膜层其系数不同。且根据电场和磁场的边界条件,可以得出

$$\begin{cases} B_2^j = \frac{\left(\frac{\bar{n}^{j-1}}{\bar{n}^j} - \frac{\cos \theta_{j-1}}{\cos \theta_j}\right) / \left(\frac{\bar{n}^{j-1}}{\bar{n}^j} + \frac{\cos \theta_{j-1}}{\cos \theta_j}\right) + B_2^{j-1}}{1 + \left[\left(\frac{\bar{n}^{j-1}}{\bar{n}^j} - \frac{\cos \theta_{j-1}}{\cos \theta_j}\right) / \left(\frac{\bar{n}^{j-1}}{\bar{n}^j} + \frac{\cos \theta_{j-1}}{\cos \theta_j}\right)\right] B_2^{j-1}} \exp(-i2k_0 \bar{n}^j z_j \cos \theta_j), (2 \leq j \leq N+1) \\ B_1^j = \frac{\cos \theta_{j+1} [\exp(-ik_0 \bar{n}^{j+1} z_{j+1} \cos \theta_{j+1}) - B_2^{j+1} \exp(ik_0 \bar{n}^{j+1} z_{j+1} \cos \theta_{j+1})]}{\cos \theta_j (1 - B_2^j)} B_1^{j+1}, (1 \leq j \leq N) \end{cases} \quad (9)$$

对于 $j = N+1$, B_1^{N+1} 是入射激光电场振幅,可取 $B_1^{N+1} = 1$ 。由于基底没有反射波,所以 $B_2^j = 0$ 。那么激光 p 偏振光的电场振幅透射系数和振幅反射系数可以写为

$$\begin{cases} t = \frac{B_1^1}{B_1^{N+1}} \\ r = B_2^{N+1} \end{cases} \quad (10)$$

同理,由于光学薄膜中的能流大小取决于坡印亭矢量 \mathbf{z} 的大小,即 $S = \frac{1}{2} \text{Re}[-E_y \times H_x^*]$,所以光学薄膜中 p 偏振光的透射率、反射率和吸收率分别为

$$\begin{cases} T = \frac{n_g \cos \theta_g |B_1^1|^2}{n_0 \cos \theta_0 |B_1^{N+1}|^2} = \frac{n_g \cos \theta_g}{n_0 \cos \theta_0} |t|^2 \\ R = |B_2^{N+1}|^2 = |r|^2 \\ \alpha = 1 - R - T \end{cases} \quad (11)$$

3 数值模拟

以高反膜 A/9(HL)H/G 为例来进行说明,高反膜的中心波长为 1060 nm,其中 H 为 TiO_2 ,其折射率 $\bar{n}_H = 2.21 - i5 \times 10^{-4}$;L 为 SiO_2 ,其折射率 $\bar{n}_L = 1.44 - i2 \times 10^{-4}$;A 为空气,其折射率为 1;G 为基底,其折射率为 1.52。

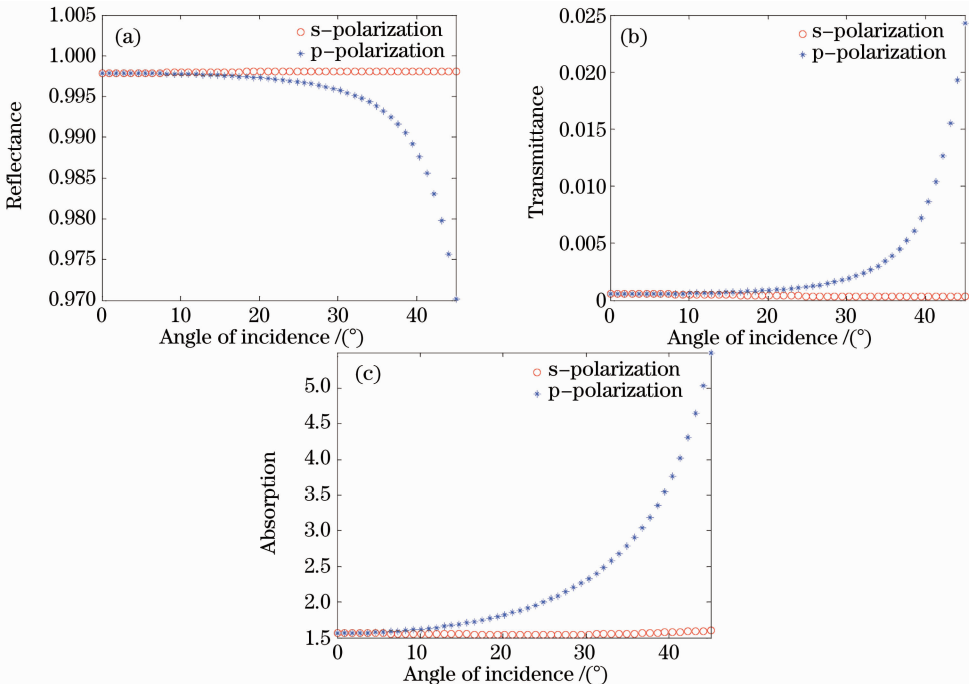


图 2 入射角对高反膜的影响

Fig. 2 Influence of different angles of incidence on high-reflection thin films

3.1 入射角对高反膜的影响

当激光斜入射时, s 偏振光和 p 偏振光表现出不同的特性。如图 2 所示, 当入射角比较小时, s 偏振光和 p 偏振光的光学特性基本相同。然而随着入射角的增大, s 偏振光的反射率、透射率和吸收率有微小的浮动; 而对于 p 偏振光的反射率、透射率和吸收率具有明显的变化, 其中反射率逐渐减小, 透射率和吸收率逐渐增大。特别对吸收率而言, 入射角为 45° 时, 相比于 s 偏振光, p 偏振光的吸收率提高了将近 3 倍。

3.2 偏振对高反膜的影响

假设入射角为 45° 时, 不同偏振对高反膜光学

特性的影响如图 3~5 所示。如图 3 所示, s 偏振光在高反膜中心波长附近有一很宽的高反带; p 偏振光也有一高反带, 但与 s 偏振光相比, 其高反带的宽度明显变窄, 而且反射率略有下降。如图 4 所示, 与反射率相反, s 偏振光和 p 偏振光在中心波长附近有一宽波段, 其透射率接近于 0, 而 p 偏振光的此带宽也明显变窄, 同时透射率有所提高。如图 5 所示, 在中心波长附近, 有一宽的波段, s 偏振光和 p 偏振光的吸收率相对很低, 而与 s 偏振光相比, p 偏振光的吸收率相对偏高。

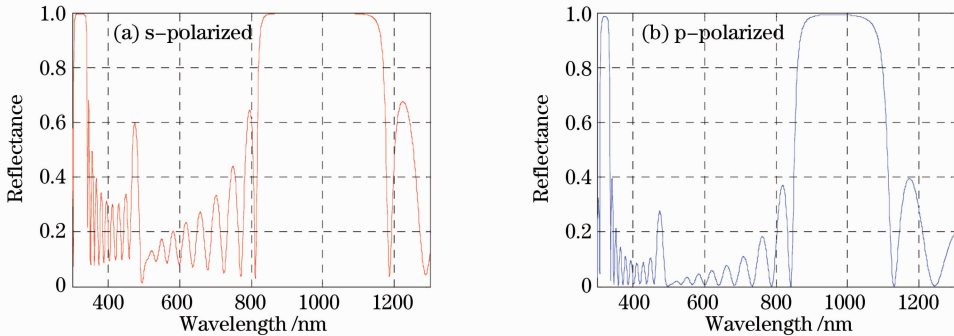


图 3 偏振对高反膜反射率的影响

Fig. 3 Influence of polarization on reflectance of high-reflection thin films

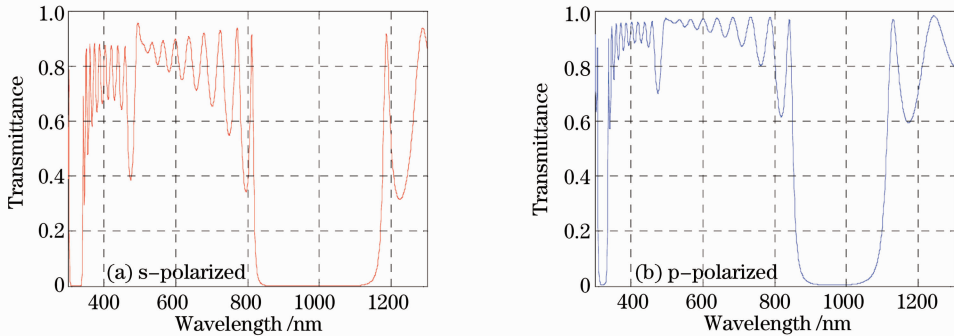


图 4 偏振对高反膜透射率的影响

Fig. 4 Influence of polarization on transmittance of high-reflection thin films

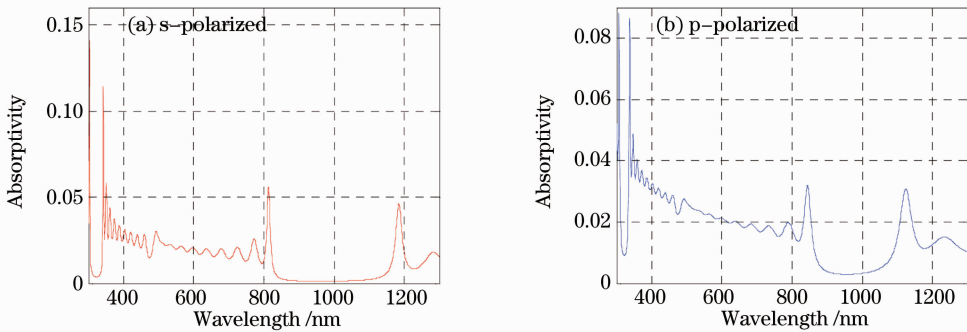


图 5 偏振对高反膜吸收率的影响

Fig. 5 Influence of polarization on absorptivity of high-reflection thin films

4 结 论

从麦克斯韦方程组出发,分别得出了多层光学薄膜中 s 偏振光和 p 偏振光的电磁场分布,并通过数值模拟得出了如下结果:随着入射角的增大,s 偏振光的反射率、透射率和吸收率有微小的浮动;而 p 偏振光的反射率、透射率和吸收率有明显的变化,其反射率逐渐减小,透射率和吸收率逐渐增大;在高反膜中心波长附近,s 偏振光和 p 偏振光均有一高反的宽带,与 s 偏振光相比,p 偏振光的宽带有明显的变窄,而且 p 偏振光的吸收率相对较高。

参 考 文 献

- 1 Connel G. A. N., Goodman J. W.. Laser-induced local heating of multilayers[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(6): 1106~1114
- 2 Chen Faliang, Hu Peng. Thermal and mechanical damage characteristics of two reflective multilayers films under laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11): 1610~1616
陈发良, 胡 鹏. 两种反射膜系的激光热力损伤特性[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(11): 1610~1616
- 3 Dai Fu, Xiong Shengming. Laser beam diameter effect on temperature rise of films[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(12): 1983~1986
代 福, 熊胜明. 光斑尺寸对光学薄膜元件温升的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(12): 1983~1986
- 4 Zhou Ming, Fan Zhengxiu, Shao Jianda. Thermal effect of optical film with the combined irradiation of different wavelength lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2608~2611
周 明, 范正修, 邵建达等. 不同波长激光同时辐照薄膜热效应研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(10): 2608~2611
- 5 Zhou W. J., Yuan Y. H.. Thermal effect of TiO₂/SiO₂/K₉ film by 1.06 μm CW laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9): 1307~1311
周维军, 袁永华. 1.06 μm 连续激光辐照 TiO₂/SiO₂/K₉ 薄膜元件温升规律研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(9): 1307~1311
- 6 Fan Zhengxiu, Tang Xuefei. Temperature field design of optical coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 463~467
范正修, 汤雪飞. 光学薄膜的温度场设计[J]. *光学学报*, 1995, **15**(4): 463~467
- 7 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. The Physics of Materials Interaction with Laser[M]. Beijing: China Machine Press, 1996. 10
陆 建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 10
- 8 Li Chenzu, Zhao Fengzhang. Electrodynamics Tutorial [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2005
李承祖, 赵凤章. 电动力学教程[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005
- 9 Ji Jiarong. Advanced Optics Tutoria[M]. Beijing: Science Press, 2007
季家镛. 高等光学教程[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- 10 Wang Ying, Liu Xu, Zhang Yueguang *et al.*. Numerical analysis of thermal response of mid-infrared high reflectance coating under different laser irradiation angles[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4): 2382~2386
王 颖, 刘 旭, 章岳光等. 激光入射角度对薄膜热场分析影响的数值模拟[J]. *物理学报*, 2007, **56**(4): 2382~2386