

$$\Omega = 2\pi\rho_0 E_0 / \hbar, \quad (17)$$

$\Omega$ 称为拉比(Rabi)频率,它与入射光振幅 $E_0$ 成正比,这里 $\rho_0$ 为介质粒子共振跃迁平均偶极矩, $\hbar$ 为普朗克常数.随着时间的进一步延伸,起伏振荡逐渐减弱,最后在大于 $T_1$ 和 $T_2$ 的时间范围内,过渡到不随时间变化的稳态行为.

由于透射光场振幅随时间所作的阻尼式振荡行为,与共振介质的谱线宽度和加宽性质等因素有直接关系,因此可通过光学章动效应的研究,获得有关介质的许多有价值的信息.

\* \* \*

除本文上面介绍的内容以外,还有一系列强光谱学效应、强光击穿效应、强光光压和光悬浮效应、强光加速粒子、强光推进(动力)、强光多光子电离与离解、强光光电导与光电发射、强光化学与强光生物学效应等,也是人们十分重视和感兴趣的强光光学研究课题,但限于篇幅,不能一一在此介绍.

### 参 考 文 献

- [1] R. Y. Chiao et al., *Phys. Rev. Lett.*, **13**(1964), 479.
- [2] Y. R. Shen, *Prog. Quantum Electron.*, **4**(1975), 1; J. H. Marburger, *Prog. Quantum Electron.*, **4**(1975), 35.
- [3] P. L. Kelley, *Phys. Rev. Lett.*, **15**(1965), 1005.
- [4] M. M. T. Loy, Y. R. Shen, *IEEE J. Quantum Electron.*, **9**(1973), 409.
- [5] M. M. T. Loy, Y. R. Shen, *Phys. Rev. Lett.*, **22**(1969), 994; **25**(1970), 1333.
- [6] Y. R. Shen, M. M. T. Loy, *Phys. Rev. A.*, **3**(1971), 2099.
- [7] A. Yariv, *IEEE J. Quantum Electron.*, **14**(1978), 650.
- [8] Б. Я. Зельдович и др., *Письм. ЖЭТФ*, **15**(1972), 160.
- [9] A. Yariv, *Opt. Commun.*, **21**(1977), 49.
- [10] R. W. Hellwarth, *J. Opt. Soc. Am.*, **67**(1977), 1.
- [11] D. M. Bloom, G. C. Bjorklund, *Appl. Phys. Lett.*, **31**(1977), 592.
- [12] A. Yariv, D. M. Pepper, *Opt. Lett.*, **1**(1977), 16; R. L. Abrams, R. C. Lind, *Opt. Lett.*, **2**(1978), 94; **3**(1978), 205.
- [13] G. Martin, R. W. Hellwarth, *Appl. Phys. Lett.*, **34**(1979), 371; D. G. Steel et al., *Appl. Phys. Lett.*, **35**(1979), 376.
- [14] D. M. Bloom et al., *Opt. Lett.*, **2**(1978), 58.
- [15] A. Szoke et al., *Appl. Phys. Lett.*, **15**(1969), 376.
- [16] H. M. Gibbs et al., *Phys. Rev. Lett.*, **36**(1976), 1135.
- [17] F. S. Felber, J. H. Marburger, *Appl. Phys. Lett.*, **28**(1976), 731.
- [18] H. M. Gibbs et al., *Appl. Phys. Lett.*, **35**(1979), 451; D. A. B. Miller et al., *Appl. Phys. Lett.*, **35**(1979), 658.
- [19] P. W. Smith et al., *Appl. Phys. Lett.*, **30**(1977), 280; *IEEE J. Quantum Electron.*, **14**(1978), 207.
- [20] П. Г. Крюков и др., *УФН*, **99**(1969), 169; В. С. Летохов, *ЖЭТФ*, **56**(1969), 402; S. L. McCall et al., *Phys. Rev.*, **183**(1969), 457.
- [21] N. A. Kurnit et al., *Phys. Rev. Lett.*, **13**(1964), 576; I. D. Abella et al., *Phys. Rev.*, **141**(1966), 391.
- [22] C. V. Heer, P. F. McManamon, *Opt. Commun.*, **23**(1977), 49.

## 微波的生物效应

曹菊良 胡仁明

(上海交通大学) (上海第二医学院)

### 一、引 言

人体内各种元素的电子有规则地运动着,电子运动必然有电磁辐射.微波是一种快速交变的电磁场.当微波辐射到人体上时,体内的电子及离子在库仑力及洛伦兹力作用下作交变

的螺旋运动,并与周围大分子、离子频繁地碰撞.体内离子极化方向也交变地旋转.微波的作用,改变了人体内电荷的正常运动状态,造成人体特异感觉或发生某种现象,这叫场力效应.由于电磁场的集肤效应,微波频率愈高,波长愈短,则微波的穿透深度愈浅.有场力效应时也伴随有热效应.若微波功率较小,在电磁场作用

下,机体内产生小量的热,由于血流,出汗等调节机能的作用,组织温度并不升高,这时的电磁效应称为非热效应,也称为热外效应。

## 二、热效应

用电磁波对人体照射,产生热效应,使机体温度升高。如用频率为 200 兆赫,功率为 165 毫瓦/厘米<sup>2</sup>的电磁波,通过喇叭天线对狗辐射,狗的直肠温度会升高 1.7℃ 左右。狗的呼吸加快,喘息、唾液分泌增加,烦躁不安。受微波照射后,机体的大多数器官,特别是肝、脾、肾及肺都呈一般性充血。睾丸、脑、胰腺及心脏充血情况较轻。胃肠道普遍呈青紫色。

将人体组织温度提高到 43℃ 以上,将能抑制癌细胞的生长。肿瘤组织含水多,易吸收微波而发热。肿瘤组织血流量少,散热能力差,温度要比周围正常组织高 5℃ 左右,正常组织能承受 43—45℃ 温度,故可用微波辐射人体,配合化疗、γ 射线等来治疗癌肿。

## 三、对血相影响

微波对血相的影响,与辐射频率、功率密度和照射时间有关。如用 2,800 兆赫、100 毫瓦/厘米<sup>2</sup>的微波照射六小时后,淋巴细胞、嗜酸性细胞稍有减少,白细胞及中性细胞增加。停止照射 24 小时后,白细胞及中性细胞仍比正常值稍高,而淋巴细胞及嗜酸性细胞恢复到正常水平。照射后,立即测定红血球脆性,没有什么改变,血液凝固及血块收缩时间在正常范围内。血液粘稠度增加,血球容积也增加。血浆 Fe<sup>59</sup> 清除率降低,出现了明显的低铁血症,全铁血浆转换率降低。

血液的介电常数  $\epsilon$  与频率  $f$  的关系如图 1 所示,并可用下面的公式表示:

$$\epsilon = 5 + \frac{70 - P}{1 + (1.5/\lambda)^2}, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为电磁波波长(厘米),  $P$  为宏观分子所占体积的百分比。从图 1 可见,由于  $f$  小于 100

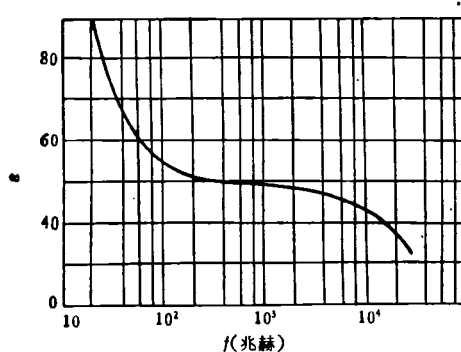


图 1

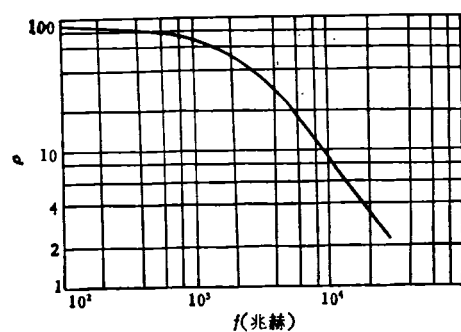


图 2

兆赫时细胞膜的电容为 1 微法/厘米<sup>2</sup>,膜的表面影响了组织在低频时的阻抗值,故  $\epsilon$  很大。当  $f$  在 100 兆赫到 10,000 兆赫的范围,膜被短路,故电特性变化比较平坦。在 10,000 兆赫以上,机体下的水分起了重要作用,故  $\epsilon$  曲线又迅速下降。

图 2 表示电阻率  $\rho$  (欧·厘米)与  $f$  的关系。电导率  $\sigma = 1/\rho$  与  $f$  的关系为

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{70 - P}{60\lambda} \cdot \frac{\left(\frac{1.5}{\lambda}\right)^2}{1 + \left(\frac{1.5}{\lambda}\right)^2}, \quad (2)$$

式中  $\sigma_0$  是血液在低频 (1—10 兆赫) 时的电导率,与血液的含盐量有关。  $P, \lambda$  与 (1) 式同。  $\sigma_0$  的典型值是生理盐水电导率的一半。从图 2 可见,当  $f$  小于 1,000 兆赫时,因血液内包含大量水分,  $\rho$  的变化很平坦。在 1,000 兆赫以上,水的电导率在高频时迅速增加,故  $\rho$  的曲线迅速下降。

#### 四、对神经系统作用

用 2,800 兆赫, 180 毫瓦/厘米<sup>2</sup>的连续波照射兔头一侧, 另一侧屏蔽。则受照射的一侧瞳孔扩大, 屏蔽的一侧瞳孔缩小。用 2,450 兆赫的微波照射兔脑, 引起了局限性凝固性坏死。用 10,000 兆赫, 200 毫瓦/厘米<sup>2</sup>的微波照射猫的神经纤维, 温度达到 45℃, 则产生伤觉反射。这种反射现象与微波电场的方向及微波对感觉神经末梢的最大刺激量有关。当  $f$  为 200 到 400 兆赫时, 照射的效果更为显著。

用苯巴比妥麻醉过的狗头, 用 2,450 兆赫, 500 到 800 毫瓦/厘米<sup>2</sup>的微波照射一到七小时, 则脑池内的温升将比其他部位的温升更高。大功率的微波照射, 可破坏脑细胞, 使大脑皮质活动能力减弱, 已形成的条件反射受抑制。长期照射后, 可使神经系统紊乱, 出现疲倦, 嗜睡, 头痛, 手颤抖等现象。但用小功率 (10 毫瓦/厘米<sup>2</sup>), 甚高频波对兔作短暂的照射, 反而使它对各种刺激的条件反射增强。继续延长照射时间, 则产生抑制性反应。

人耳对 200—3,000 兆赫频率, 适当功率 (如 400 毫瓦/厘米<sup>2</sup>) 的电磁波, 有射频听觉现象, 能听到“嗡嗡”或“敲击”声。耳聋的人一样能感受到这种声音。这是微波直接对听觉神经作用的结果。听到的音响与微波的调制频率一致。平均功率相同的脉冲波比连续波作用更为强烈。耳对微波的听觉是一种非热效应。耳神经象半导体一样有整流作用。特别是耳神经可感受到射频脉冲的重复频率。

用小功率 10 毫瓦/厘米<sup>2</sup>, 3,000—30,000 兆赫的微波照射神经系统, 发现细胞蛋白质的代谢发生改变。机体温度没有升高, 故这是一种非热效应。对非热效应最敏感的是中枢神经系统, 这种作用是通过皮肤及大脑细胞而产生的。频率高, 对皮肤感受器作用强; 频率低, 对脑细胞的作用强。

#### 五、对心血管系统的作用

用微波照射心脏, 使心血管系统会有血液动力学的失调, 血管通透性增加, 心肌纤维间充血, 并呈透明变性。降低微波辐射功率, 增长辐射时间, 可发现心动过缓, P 波变形, S-T 波段有改变, QRS 波增宽。

用 2,800 兆赫, 165 毫瓦/厘米<sup>2</sup>对狗照射 30 分钟, 有出血性心肌改变。用 2,450 兆赫, 70 毫瓦/厘米<sup>2</sup>对棕鼠照射 2—10 分钟, 其右心房内压力增加。用 5 毫瓦/厘米<sup>2</sup>照射狗 30 分钟, 发现心率及凝血时间改变, 血压下降。

有人调查过在微波领域长期操作的人员, 普遍表现心血管功能性损伤: 张力减低, 心动过缓, 心房—心室传导减慢, 心电图波形幅度降低。但其工作能力没有削弱, 而且在离开微波领域后可以恢复正常。

人体中位于主动脉弓内产生反射的区域中的感受器, 颈动脉窦以及心房壁各层对微波十分敏感。一次微波照射后, 感受器就会发生形态学变化, 但可以恢复正常。

#### 六、对消化系统的作用

对人体用小功率的微波进行照射, 可增加肠胃吸收功能。例如, 振荡器功率为 50—70 瓦, 频率为 2,407 兆赫, 用同轴线内导体作电极 (电极面积为 25.4 厘米<sup>2</sup>), 距上腹部皮肤 7—8 厘米, 辐射 10 分钟, 辐射后肠吸收率提高到 72.5% (正常为 62.2%), 胃吸收率提高到 29.4% (正常为 18.9%)。但大功率的微波辐射则能使肠胃粘膜充血, 甚至溃疡。

#### 七、药物对微波辐射的影响

在微波照射前, 服药的狗与未服药的狗对照射的反应不一样。例如, 用 2,800 兆赫, 165 毫瓦/厘米<sup>2</sup>的微波照射, 服苯巴比妥的狗温升 2.53℃; 服氯丙嗪的狗温升 1.39℃; 服硫酸吗

啡的狗温升  $1.18^{\circ}\text{C}$ ，而未用药的狗温升却只有  $0.7^{\circ}\text{C}$ 。

其他实验也表明，用氯丙嗪能抑制动物对微波照射的适应能力。

## 八、对眼的作用

用  $2,800$  兆赫， $220\text{—}240$  毫瓦/厘米<sup>2</sup>的微波对狗眼照射 45 分钟后引起明显结膜充血，眼内有浓性分泌物排出，并大量分泌唾液，烦躁不安。照射结束后 10 天，晶状体后侧面皮质上半部呈不均匀的深色混浊，然后逐渐变成白色，一直持续二个半月，以后混浊才逐渐减退。这是可恢复性损伤。将兔每天用微波辐射 10 分钟，连续三天，发现照射时十分躁动，唾液分泌增多，眼球有明显的反应。第三次照射后的第二天，引起严重的眼色素层炎，晶状体完全呈珍珠样混浊，眼球萎缩，已不可恢复。

实验表明，用微波辐射晶状体，可以观察到在它后囊中的变化。后囊通透性有明显增加，并有硫酸盐标记转换率的缺损。用  $2,450$  兆赫， $280$  毫瓦/厘米<sup>2</sup>的微波照射兔眼，发现影响正离子分布的因素并不敏感。晶状体等其他成分也未受影响。造成混浊的电平阈值与照射时间有关(如图 3 所示)。蛋白质，氨，葡萄糖乳酸盐成

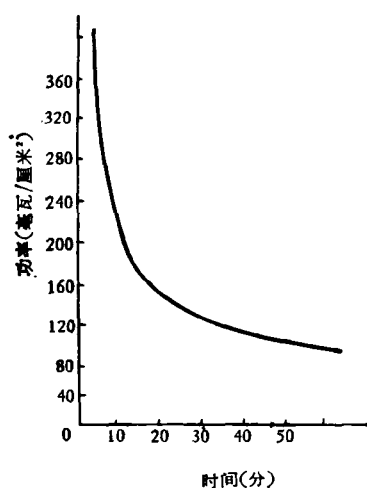


图 3 混浊的功率密度与照射时间的关系

分只在混浊后减少。维生素 C 及麦胱甘肽的变化更为敏感。

对人眼，功率密度小于  $300$  毫瓦/厘米<sup>2</sup>时造成可恢复性伤害。大于  $300$  毫瓦/厘米<sup>2</sup>时造成不可恢复性伤害，形成白内障，晶状体内磷酸酶的活力消失，新陈代谢失去平衡，类蛋白(proteinoids) RNA 成分转换率增高，晶状体囊的通透性也明显增高。

## 九、对生殖系统的作用

人的睾丸靠近皮肤，微波容易透入，使它温度升高，并可抑制精子生长。

用  $2,800$  兆赫，大于  $10$  毫瓦/厘米<sup>2</sup>的微波照射睾丸，能损伤精小管。用  $2,400$  兆赫， $250$  毫瓦/厘米<sup>2</sup>的微波照射棕鼠睾丸 5 分钟，造成睾丸水肿及肿胀，萎缩，纤维化及精小管凝固性坏死。照射后过 13 天，才有明显的恢复。用红外线照射若产生同样的上升温度，而微波造成的损伤比红外线造成损伤严重，这可能是由于脑垂体反应之故。

将出生 2—3 个月的鼠，用  $10,000$  兆赫， $400$  毫瓦/厘米<sup>2</sup>的微波照射 5 分钟，能引起动情周期延长，动情次数减少。将雄性动物用微波照射，但保持生育能力，然后与正常的雌性动物交配，能使下一代的数目减少，下一代的平均体重减轻，而且死产数目增加。用微波照射鸡蛋，能使胚胎后部发展受到抑制，并出现畸形。微波照射雌性下腹部后，生殖上皮有蓄积性萎缩性变化，卵巢内滤泡上皮细胞萎缩，细胞核发生固缩。雌性生殖腺比雄性对微波更为敏感。

## 十、与电离辐射混合使用的效果

将微波辐射与 X 射线混合使用，与单用 X 射线辐射结果不一样。

有两组鼠，一组受过  $100$  毫瓦/厘米<sup>2</sup>的微波照射，另一组未受任何照射，同样经受 X 射线( $700\text{—}900$  伦琴)的照射。则受过微波照射的一组死亡率低，平均寿命延长  $10\text{—}20\%$ 。先用 X

射线照射过的鼠与未照射的鼠同样再受微波照射,则照射过X射线的鼠死亡率高,存活时间短。体重为200—250克的棕鼠分两组,都接受700伦琴的X射线照射,其中一组同时又加2,800兆赫,39毫瓦/厘米<sup>2</sup>的微波照射38分钟,结果只照X射线的一组死亡率高达80%,受X射线和微波同时照射的一组死亡率低(40%)。先进行微波照射,然后进行X射线照射(950伦琴)的九条狗,无一死亡。未受微波照射的八条狗受同样的X射线照射后,三条狗在四天内死亡。用25,000伦琴的X射线照射狗,先受过微波照射的狗存活时间平均达43小时,先未受过微波照射的狗存活时间平均22小时。

有两组棕鼠,一组用2,500兆赫,10毫瓦/厘米<sup>2</sup>微波每天照30分钟,连续照25天。另一组未受任何照射。然后二组都受600伦琴的 $\gamma$ 射线照射,结果先受过微波照射的一组死亡率只是另一组的三分之一。

可见微波有缓解电离辐射的作用。作用的大小与微波辐射功率、时间及电离辐射的次序有关。有一种解释为:微波照射后造成红血球输氧能力减低而缺氧,减少了游离基团的形成及毒性的作用。在交变场内分子的交变运动可对靶分子起阻止作用。非致死性微波照射缓解X及 $\gamma$ 射线作用,可应用于宇宙航行中。

### 十一、微波对动物其他部分的作用

微波辐射的热效应及场力效应可影响内分泌。用1,280兆赫及2,800兆赫的微波照射狗的甲状腺,则甲状腺活动增加,这可能是脑垂体的促甲状腺激素的活力增加之故,这与微波引起下视丘-脑垂体-肾上腺活动的激发作用相一致。用10,000兆赫低功率(20—60毫瓦/厘米<sup>2</sup>)微波照射,可使内分泌失调,生长率增加。用3,000兆赫的微波照射后,生长速率增加4—6%,体重增加较快,蛋白质的合成加快,基础代谢也加强。

用2,000—3,000兆赫的微波照射人和动物,能造成肾上腺皮质改变,肝、心及脑干内的

血清胆碱脂酶的活性降低。

微波照射过的动物,抗原吸收较慢,吸收抗原后形成抗体也较慢,以及形成抗体后其代谢或排除也较慢。

微波透入脂肪的深度可用下式表示:

$$D = \frac{\sqrt{\lambda\rho}}{17} \propto f^{-\frac{1}{2}} \quad (60\lambda > \epsilon\rho),$$

$$D = \frac{\sqrt{\epsilon\rho}}{377} \propto f^{-2} \quad (60\lambda < \epsilon\rho),$$

而 $\epsilon, \sigma = 1/\rho$ 与含水量有关,如图4的曲线所示。

### 十二、微波的非热效应

对生物细胞微粒,当场强达到100伏/厘米时,便产生场力效应。建立场力效应的时间常数 $T$ 与场强成反比。为了建立场力效应,外加场强必须大于场强阈值 $E_{th}$ ,为了建立场力效应,需要的脉冲宽度 $T_2$ 与 $E$ 的关系如图4所示。当场强小于 $E_{th}$ 时,不再产生场力效应。

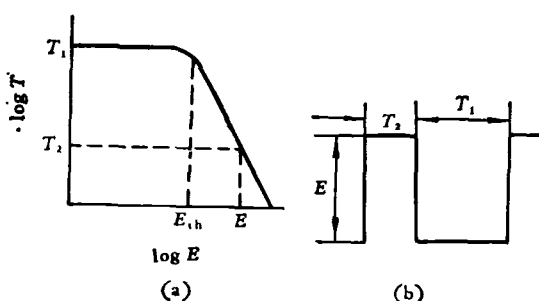


图4  $T$ 与 $E$ 的关系

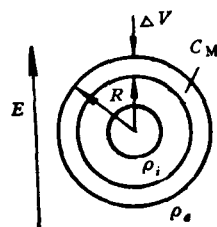


图5 简化的神经细胞

图5为神经细胞。 $\Delta V$ 为神经纤维膜上的电位, $E$ 是外加电场。 $\rho_i, \rho_e$ 是膜的内电阻与外

电阻,  $C_M$  是膜每平方厘米表面积电容,  $\omega$  是  $E$  的角频率,  $R$  是神经细胞半径. 当  $f \approx 100$  兆赫时, 膜电位

$$\Delta V = \frac{2RE}{\sqrt{1 + [\omega C_M R(\rho_i + \rho_a)]^2}}$$

当  $\Delta V$  达到数毫伏时, 才能激励神经细胞, 并传导兴奋过程. 通常  $C_M = 1$  微法/厘米<sup>2</sup>.

活细胞中的谐振吸收被认为是一种非热效应. 用顺磁共振已能确定蛋白质分子偶极矩及阐明晶体蛋白质的结构. 在有机及无机颗粒悬浮液中已证实了珠链形式的作用.

### 十三、关于安全标准

人体是一个复杂的有机体. 小功率的微波照射人体, 能提供激励细胞的能量, 引起兴奋, 促进新陈代谢, 加速血液循环, 提高肠胃吸收功

能. 大功率的微波对人体有害. 为了防止对人体的伤害, 可穿屏蔽衣帽, 戴屏蔽眼镜.

美、英等国认为 10 毫瓦/厘米<sup>2</sup> 不会引起体温升高. 作为安全标准, 军队可在 100 毫瓦/厘米<sup>2</sup> 下活动. 苏、波等国根据对在微波领域内的操作人员健康状况和微波的非热效应而制定的安全标准要小得多, 根据每日受微波辐射的时间长短, 其安全标准在 0.01—1 毫瓦/厘米<sup>2</sup>. 我国电子工业部门制订的微波辐射安全标准是  $\leq 0.38$  毫瓦/厘米<sup>2</sup>.

### 参 考 文 献

- [1] S. M. Michaelson, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, **MTT-19-2** (1971), 131.
- [2] H. P. Schwan, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, **MTT-19-2** (1971), 146.
- [3] W. D. Hershberger, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, **MTT-26-8** (1978), 618.
- [4] S. M. Michaelson, *Proc. IEEE*, **68-1** (1980), 40.

## 二维傅里叶变换核磁共振波谱学

王 金 山

(北京师范大学)

### 一、原 理

普通的核磁共振谱图是一个平面图, 它是一个变量 (频率或磁场) 的函数  $S(\omega_1)$ , 因此可以把它称为一维谱. 在七十年代后半期出现了一个新的领域, 称为二维核磁共振波谱学 (two dimensional nuclear magnetic resonance spectroscopy). 它使核磁共振谱变为两个变量的函数  $S(\omega_1, \omega_2)$ , 因此可以得到一个立体图或等高线图, 从而使谱图更加直观、清晰、便于解析, 并能够提供更多的信息, 扩大了核磁共振的应用范围.

虽然用普通的连续波方法可以得到二维谱, 但目前用得最多的是脉冲傅里叶变换方法, 称为二维傅里叶变换核磁共振波谱学 (2DFT-

NMRS)<sup>[1]</sup>. 在这种方法中首先需要得到一个依赖于两个时间变量  $t_1, t_2$  的函数  $S(t_1, t_2)$ . 为此把时间轴分为三个区域, 如图 1 所示.  $t < 0$  的时间称为预备期, 在此期间把原子核系统设置在某个初始状态.  $0 < t < t_1$  的时间称为发展期, 在此期间核系统受到哈密顿算符  $\mathcal{H}^1$  作用而发生变化, 在这个周期之末, 核系统处于  $\mathcal{H}^1$  和  $t_1$  所决定的状态.  $t > t_1$  称为检测期, 并把它标记为  $t_2$ , 在此期间, 核系统受到另一个哈密顿算符  $\mathcal{H}^2$  的作用而发生更大的变化, 并且在此期间内检测磁化强度的横向分量  $M_y$  的变化. 这时  $M_y$  不仅是  $t_1$  的函数, 而且也是  $t_2$  的函数. 因此得到了依赖于两个时间变量的函数  $S(t_1, t_2)$ . 这就是时间域的二维自由感应衰减信号. 在实验中是陆续改变  $t_1$  的数值, 得到一系列相应的作为  $t_2$  的函数的自由感应衰减, 只