

表5 处理三代突变品系性状的比较(平均值及标准差)

品 种	处理方法	突变品系	株高(厘米)	主茎节数	单株荚数	单株粒数	单株种子重量(克)
满仓金	He-Ne, 10分	75-2-1	47±2.80	18±0.47	128±8.59	205±11.44	22±1.11
满仓金	钹玻璃 10次	75-4-3	51±3.46	19±0.59	124±5.20	203±10.44	21±1.06
满仓金	对 照		104±1.99	21±0.66	92±7.48	175±15.84	20±2.31



图5 满仓金 M_3 矮株突变型和对照的比较

授对本文的照片给予热心的指导和帮助。本系毕业生任占林、刘建华等参加实验的部分工作, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 梁宏等;《激光》, 1981, 8, No. 7, 43.
- [2] 关崇文;《激光》, 1982, 9, No. 11, 739.
- [3] 中山大学生物系遗传教研室;《激光》, 1978, 5, No. 4, 30.
- [4] G. R. Palmer *et al.*; *Crop Sci.*, 1973, 17, 389.
- [5] H. W. Johnson *et al.*; *Bot. Gaz.*, 1960, 122, 77.
- [6] 中山大学生物系植生遗传学教研室;《中山大学学报》, 1975, 4, 8.
- [7] 王金陵;“大豆的遗传与育种”, 科学出版社, 1958, p. 27.

(哈尔滨师范大学生物系 严国忠
1984年1月9日收稿)

激光生物加热定量分析

Abstract: This paper gives a quantitative analysis on the vaporization of tumors by pulsed CO_2 laser, skin cutting by CW CO_2 laser, tissue coagulation by argon laser, thermal killing of tumor cells by He-Ne laser and hot compression by CO_2 laser. Although the calculations are based on a simplified skin model, it may be useful in clinical treatment.

激光对生物体有热作用、压强作用、光化作用、电磁场作用和生物刺激作用^[1], 其中用得最广泛的是热作用。热作用的具体表现是气化、切开和热凝组织、热杀细胞和局部热敷。具体表现为哪一种形式, 则决定于激光波长、照射时间以及在照射面上的功率密度, 还取决于生物组织的反射、折射、吸收、散射、透射、密度、比热、热导率、热扩散率、热传递系数、色素类型、分布和密度、血管分布、血速和血氧合以及诸层状结构、细胞的分裂程度、分裂速率和代谢状态等。

影响热作用的因素诚然很多, 但因素有主有次, 下面根据能量关系作定量分析。

一、脉冲 CO_2 激光气化肿瘤

肿瘤吸收 CO_2 激光变为热, 使自身温度上升, 在上升到 100°C 以前, 热引起组织变性。到 100°C 以上体液就沸腾。因相变迅速, 蒸气的巨大压力将冲破皮肤逸出, 并喷射一些组织碎片。激光就是这样气化肿瘤的。

设 CO_2 激光的输出功率为 P 瓦, 能量分布是高斯型, 照射时间为 t 秒, 光束和肿瘤半径都是 r 厘米,

肿瘤深 b 厘米,由能量关系可写出:

$$(1-R)Pt = \pi r^2 b \rho J (L + C\Delta T) \quad (1)$$

式中 R 是表皮的反射率(对 CO_2 激光约是 0.05), ρ 是组织密度 (1.2 克/厘米³), J 是焦耳常数(4.18 焦耳/卡), L 是组织潜热 (540 卡/克, 设和水 100°C 的相等), C 是组织比热(0.86 卡/克·°C), ΔT 是组织达到沸点时的温升 (100°C - 36.5°C = 63.5°C)。将已知值代入上式得:

$$Pt = 9.87 \times 10^4 r^2 b \quad (2)$$

或

$$\left(\frac{P}{\pi r^2}\right)t = 3.14 \times 10^4 b \quad (2')$$

由式(2)可见,气化肿瘤所需要的能量和其体积成正比,由式(2')得,所需能量密度则和其深度成正比。设 $r=b=0.2$ 毫米, $P=60$ 瓦,则气化时间是 13 毫秒。

若肿瘤是半径为 r 的半球体,则根据能量关系可写出:

$$(1-R)Pt = \frac{2}{3} \pi r^3 \rho J (L + C\Delta T) \quad (3)$$

将已知值代入 $Pt = 6.0 \times 10^4 r^3 \quad (3')$

设 $r=0.2$ 毫米, $P=60$ 瓦,则气化时间是 8 毫秒。

上面说沸腾发生在 100°C 以上(计算是用 100°C),是因为所发生的现象有点象加压锅,皮肤起着锅盖作用。继续吸热将使体液温度上升,蒸气压增大,只有蒸气压大于组织和皮肤弹性限度时才能冲破皮肤,出现气化现象。若加热较缓慢,则在所有水都失去后,组织结构将崩变,甚至碳化,此时温度可达 1000°C。

二、连续 CO_2 激光切开皮肤

由上述分析可见,直径为 $2r$ 的光束,要照射 t 秒才能使气化深度(即此时的切开深度)达 b 厘米。平均来说一次切开的速度 v :

$$v = 2r/t \approx 6.42 \times 10^{-4} \times \frac{P}{\pi r^2} \times \frac{r}{b} \quad (4)$$

若 $r=0.2$ 毫米,切深 $b=1$ 毫米, $P=60$ 瓦,则切速 v 约是 0.62 厘米/秒。

应指出激光切割能力与激光聚焦的准确度有密切关系,即应刚好聚焦于平坦的切割面。

三、钕激光热凝组织

钕激光最适合用来热凝组织,因其线性吸收系数小,只有 11 厘米⁻¹,98% 的光被吸收时的贯穿深度 $d=4/11 \approx 0.36$ 厘米。已知组织蛋白在 40~50°C 温度下持续 1 分钟就会热凝。只要不发生相变,温度越高,凝固越快。式(1)中的 ΔT 取 63.5°C, $L=0$,

其他不变,将已知值代入式(1)得:

$$Pt = 9.06 \times 10^3 r^2 L \quad (5)$$

若 $r=5$ 毫米, $b=2$ 毫米, $P=1$ 瓦,则光凝时间是 7.5 分钟。附带指出,用 CO_2 激光切割时,常用 12 瓦/厘米² 的散焦光束封住被切断的中小血管。

四、He-Ne 激光热杀癌细胞

近年来有前途的治癌新法之一是用激光照射局部热杀癌细胞,最佳方案是使癌细胞边缘的温度在 43°C 时受热 60 分钟(中心温度不限)。温度在 41~45°C 范围内癌细胞对热比正常细胞更敏感。在 50°C 时癌细胞和正常细胞都很快被热杀,无差别。

组织中的热分布可以由下面的方程求得:

$$J' = -H_c \text{grad } T$$

$$\text{div } J' = -\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + q \quad (6)$$

式中 J' 是热通量矢量, T 是温升, H_c 是导热率, q 是热能。温度稳态分布是:

$$T = \frac{-\beta I_t}{H_c(\beta^2 - \beta_h^2)} \cdot e^{-\beta x} + c_1 e^{\beta_h x} + c_2 e^{-\beta_h x} \quad (7)$$

式中 β 是光学总衰减系数, β_h 是热衰减系数, $\beta_h = \sqrt{G/H_d} = 1/d_h$, G 是血流量, H_d 是热扩散系数, d_h 是热贯穿深度, c_1 和 c_2 是常数。边界条件是当表面失热可以忽略以及组织是半无限大时,

$$T = \frac{\beta I_t}{H_c(\beta^2 - \beta_h^2)} \cdot \left\{ \frac{\beta}{\beta_h} e^{-\beta_h x} - e^{-\beta x} \right\} \quad (8)$$

已知波长 633 毫微米的 He-Ne 激光的贯穿深度是 2 毫米,热导率 $H_c = 4 \times 10^{-3}$ 瓦/厘米·°C,再取一组热贯穿深度 d_h 的值,以用图解画出(8)式的结果,见图 1。由图可见,血流量越大,温升越小;部位越

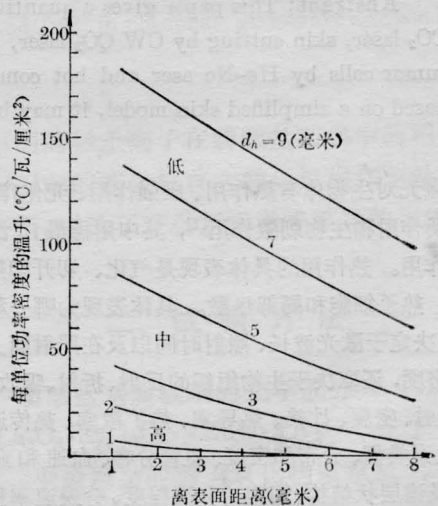


图 1

表1 He-Ne 激光热杀深度(宽束, 始温 37.5°C)

穿透光功率密度 (毫瓦/厘米 ²)	有效曝光时间 (分)	要求达到的最低温度 (°C)	每单位功率密度的温升 (°C/瓦/厘米 ²)	热杀深度(毫米)		
				血 流 量		
				低	中	高
100	60	43	55	9~13	0~4	~0
50	60	43	110	4~7	~0	~0
100	30	44	65	8~12	0~3	~0
50	30	44	130	2~5	~0	~0
100	15	45	75	7~10	0~2	~0
50	15	45	150	0~4	~0	~0

深, 温升越小。还应说明, 光穿透功率密度可能比入射值小许多, 如猪肝的反射系数是 0.18, 而牛脑的是 0.60。

表 1 列出穿透功率密度不同, 血流量分高中低三档时的热杀细胞深度。由表可见, He-Ne 激光功率密度 100 毫瓦/厘米²、曝光时间 15~60 分, 血流量低时, 热杀深度可达 10 毫米; 反之, 若血流量高, 就只能热杀表层细胞。若穿透功率密度为 50 毫瓦/厘米², 血流量低时在所有曝光时间内, 其热杀深度约为 5 毫米, 血流中速或高速, 则热杀小到可以忽略。就人来说, 肾的血流量高, 皮肤的中等, 肌肉和脂肪的低。

五、CO₂ 激光热敷

CO₂ 激光基本上为厚 0.2 毫米的表层皮肤吸收, 变热, 温度上升。热敷时皮温以多少度较好?

显然, 热敷的目的绝不是伤害组织。图 2 中的曲线是临界值, 在曲线上方是组织受伤区, 下方是不受伤区。由图可见, 曝光时间越短, 耐受温度就越高。

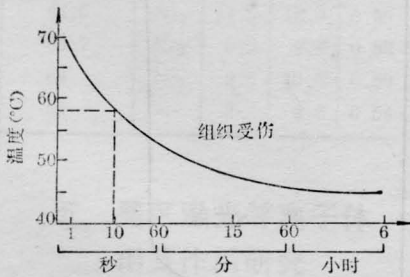


图 2

热敷一般时间较长, 设为 60 分, 由图 2 查得, 温度不应超过 46°C。时间长, 对流、蒸发、辐射、血液流动、组织传导等形式的散热都不可忽略^[3,4]。当生

热(不包括机体生热)等于失热(不包括空气传导, 因其导热率小)时, 皮温就不变。

现假设要求达到的皮温为 46°C, 体温为 37°C, 室温为 15°C, 由对流损失热量为:

$$Q_1 = H_c(T_1 - T_0) \quad (9)$$

式中 Q_1 是每秒每平方厘米的失热量, H_c 是对流传热系数(表 2), 等于 $0.166 \times 10^{-3} \Delta T^{1/4}$ (瓦/厘米²·°C), T_1 是皮温, T_0 是室温。

表 2 热传递系数

辐射	0.554×10^{-3} 瓦/厘米 ² ·°C
对流	$0.166 \times 10^{-3} \Delta T^{1/4}$ 瓦/厘米 ² ·°C
传导(组织)	1.2×10^{-3} 瓦/厘米·°C
传导(空气)	0.2×10^{-4} 瓦/厘米·°C
蒸发	0.0268×10^{-3} 瓦/厘米 ² ·托

由蒸发损失的热量

$$Q_2 = H_e(P_1 - P_0) \quad (10)$$

式中 H_e 是蒸发传热系数, 等于 0.0268×10^{-3} (瓦/厘米²·托), P_1 是 46°C 水饱和蒸气压, 等于 75.65 托, P_0 等于 12.79 托(室温)。

辐射热量损失

$$Q_3 = H_r(T_1 - T_0) \quad (11)$$

式中 H_r 是辐射传热系数, 等于 0.554×10^{-3} (瓦/厘米²·°C)。

血液流动损失热量

$$Q_4 = 4.18 G c_b \rho_b V (T_1 - T_2) \quad (12)$$

本式取 (1 厘米)³ 的组织, G 是皮肤血流量(范围 2.5~8.3), 取平均值 5.4×10^{-3} 厘米³/克·°C, c_b 和 ρ_b 是血液比热(0.92)和密度(1.05), $T_1 = 46^\circ\text{C}$, $T_2 = 37^\circ\text{C}$, V 是 46°C 时的组织体积, 估计 2×10^{-2} 厘米³。

组织传导的热量损失:

$$Q_s = H_c(T_1 - T_2)/d \quad (13)$$

式中 H_c 是热导率, 等于 1.2×10^{-3} (瓦/厘米²·°C), d 是光贯穿深度。

热扩散距离:

$$s = \sqrt{4H_c t} \quad (14)$$

式中 t 是热扩散距离为 s 所需时间, H_c 是皮肤和组织的热扩散率, 取 1.2×10^{-3} 厘米²/秒, 照射时间取 1 小时。代入上式得 $s \approx 4$ 厘米, 即热传到皮下 4 厘米。反之若照射时间为 1 毫秒, 则 $s \approx 7$ 微米, 极浅, 亦即脉冲激光引起的是定域热反应, 激光连续照射, 热才可能扩散。

参 考 文 献

- [1] 刘普和等编, “医学物理学”, 人民卫生出版社, 1981, 763~781 页。
- [2] L. O. Svaasand *et al.*; *Med. Phys.*, 1983, **10**, No. 1, 10.
- [3] A. J. Welch *et al.*; *IEEE BME*, 1980, **27**, No. 3, 161.
- [4] B. T. Volpe *et al.*; *Med. Phys.*, 1982, **9**, No. 4, 506.
- [5] Н. Ф. Гамалея; “Лазеры в клинической медицине”, Москва, Медицина, 1981, с. 45~46.

(中山医学院 刘普和 1983 年 11 月 23 日收稿)

单纵模条形半导体激光器中光功率- 电流特性扭折的机理

Abstract: The kinks in the light/current characteristics in a number of (GaAl) As-bombarded stripe lasers operating in single longitudinal mode are observed experimentally and investigated theoretically. Their mechanisms are shown to be the occurrence of the first order lateral mode, and that during their occurrence the lasers are still operating in a well-behaved single longitudinal mode.

半导体激光器的光功率-电流 ($P-I$) 特性曲线中出现扭折, 限制了线性调制范围, 并可能出现各种不稳定性^[1,2]。产生扭折的机理有多种多样, 例如由于侧向导有某种不对称性, 使基模光强分布随电流增加而引起侧向移动, 让更多的光强进入条外吸收区, 降低了微量子效率, 导致 $P-I$ 特性出现扭折^[3~6]; 波导机理发生变化, 例如由于空间烧孔而从增益波导转变为自聚焦波导时, 也使 $P-I$ 曲线出现扭折^[7,5]。本文观察到的是在达到阈值以后较大的电流范围内始终是单纵模工作的激光器, 其 $P-I$ 特性出现扭折则主要是由于出现一阶侧向导所致^[8]。

我们这批实现单纵模工作的激光器是由液相外延精心制作, 在同一外延片解理做成的。其有源层为 P 型掺硅补偿, 载流子浓度约为 5×10^{17} 厘米⁻³, 厚度为 $0.2 \sim 0.3$ 微米, 条宽为 13 微米。这些单纵模激光器的模式行为大致相似, 其 $P-I$ 光特性也大致相似, 以 129# 管为例, 在注入电流 $I = 0.985I_{th}$ (对 129# 管阈值电流 $I_{th} = 130$ 毫安) 时是多纵模的, 但稍微超

过阈值电流以后即变成单纵模工作, 其总光功率 P 随注入电流的变化在 $1.08I_{th}$ 左右出现明显的扭折,

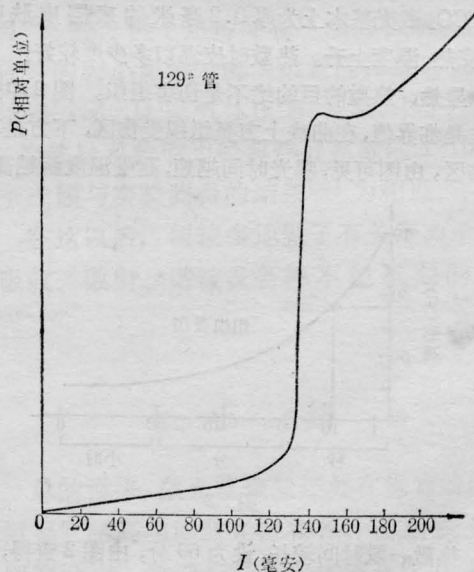


图 1 直流 $P-I$ 特性曲线