

激光辐射剂量测定法

陈彩廷 谢树森 译 雷仕湛 校

上海科学技术文献出版社

激光辐射剂量测定法

Н. Д. 乌斯季诺夫(原苏联科学院通讯院士)主编
А. И. 基里洛夫(原苏联) В. Ф. 莫尔斯科夫(原苏联)
Н. Д. 乌斯季诺夫(原苏联)

陈彩廷 谢树森 译 雷仕湛 校

(LG 28/25)



KG 28/11

上海科学技术文献出版社

1992. 12

(沪)新登字 301 号

激光辐射剂量测定法

陈彩廷 谢树森 译

雷仕湛 校

*

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路 2 号 邮政编码:200031)

上海科技文献出版社昆山联营厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 6.25 字数:186,000

1994 年 3 月第 1 版 1994 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—800

ISBN 7-5439-0492-6/T·334

定 价:11.80 元

翻译者前言

《激光辐射剂量测定法》一书是由原苏联科学院通讯院士 Н. Д. 乌斯季诺夫主编。书中综述了不同光谱波段电磁辐射的额定标准和剂量测定方法的基本原理；分析了激光的生物物理作用；对激光辐射的额定标准及构成激光辐射安全区规律性的途径；描述了激光辐射对人眼睛的影响的特征，提出了设计剂量计光学系统的原理，设计了眼睛对激光辐射剂量计的光学系统模型；研究了剂量计的电子线路设计方案、测量误差和激光辐射剂量学的度量衡学基础。

本书对在辐射额定标准、剂量测定和防护部门工作的工程技术人员、医生、卫生学家和医科大学的学生及各有关部门的工作人员是一本有价值参考书。

序 言

激光辐射的重要特性开发了它在科研、工业和医学领域应用的新途径。激光在人类活动各领域应用的日益广泛，吸引着大批专家参加到激光设备的加工制备、试验、服务业和操作工作中来。故而在激光器工作时，安全问题的综合解决变成越来越紧迫。为此，激光辐射的生物作用、额定标准、剂量测量技术和防护等问题相互联系的研究就很有必要。

激光辐射对生物体的作用，从一开始就受到极大的注意。在原苏联和国外所取得的研究成果证明激光辐射对人体各器官，首先是对视觉器官有潜在的危险性。激光安全应用标准文件的制定是医学-生物学的概括总结。在1972年原苏联制定了“激光工作暂行卫生章程”，在1981年又制定了“激光装置和应用的卫生规范和章程”№2392-81。在1973年美国公布了ANSI2-136.1标准，此标准在1976年和1980年又修改再版。在上述文件中列出了激光辐射额定标准参数的最大容许量。

在原苏联国内的文献中，谈到激光工作的卫生和劳动保护问题的文章数量非常有限，其中应当特别要指出的有下面著者的书：Б. Н. Рахманов, Е. Д. Частов 著《激光装置的操作安全性》——机器制造类，1981年，112页。В. П. Жохов, А. А. Комарова, Л. И. Максимова 等著《激光工作的劳动保护和职业病的防预》——医学类，1980年，208页。上面著作主要是论述激光辐射和伴随激光装置工作产生的多种因素对人体各器官产生作用的机理，以及使用激光工作时的安全程度。同时对激光辐射的额定标准和剂量测量技术问题阐述也还不够。作者写这本书的目的就是试图填补这个空白。

为弄清楚激光辐射对人体的危险程度，确定给定空间中某点上

激光辐射参数的数值的全部方法，称为激光辐射剂量测量技术^[12]。能量方面的基本参数有：照射人体器官的照度和曝光度，以及扩展激光辐射源的能量亮度和积分能量亮度。激光剂量测定法是剂量检测过程中以计算法，或是以直接测量为基础的。

对激光辐射剂量测量技术的方法和仪器的要求，由所采用的标准系统来决定，所用系统首先是考虑到激光辐射对人体作用的机理而建立的。这种相互联系确定了本书的结构。

在第一章中介绍了把激光辐射看作特殊情况下的电磁辐射来研究它对人体的作用机理。在此基础上，第二章指出了对额定标准的要求，其结果是对激光辐射剂量测量的方法和仪器提出要求，对问题的目前状况进行充分研究分析。第三章介绍了根据激光辐射剂量测量方法和仪器的要求，提供剂量测量仪器设计使用的资料。第四章的内容是激光辐射剂量测量技术的计算方法。

激光安全问题由各部门使用激光的专家、安全技术方面的工程师、激光技术的研究者、医生等来解决。为了了解这些问题，我们必须有相当丰富的量子电子学、光学、生物学等方面的知识。从事激光安全工作和具有不同职业修养的专家们常常很难互相了解。本书的对象是从事激光辐射剂量测量问题研究的专家，对与激光和激光装置的研究与运用的广大读者也是有裨益的。因此，根据可能，尽量顾及到向具有技术教育的读者提供生物学方面的知识。

作者们感谢 Я. Б. Дыскина (§ 1. 2, 1. 3, 3. 1; 3. 2), А. С. Наумова (§ 2. 2, 4. 4, 4. 5, 4. 6), В. И. Кишко (§ 2. 3, 3. 4~3. 8) 在准备本书的材料时给予的帮助。

作者们对苏联医学科学院士 Л. А. Ильичу 和 В. И. Иванову 教授在讨论手稿时提出的宝贵意见表示感谢，并感谢 В. И. Кухтевич 教授和 Е. Д. Чистов 教授为手稿写的书评和有助于改善书内容的宝贵意见。

目 录

序 言

第一章 激光辐射对人体的作用	(1)
§ 1.1 不同光谱波段的电磁辐射对人体的作用	(1)
§ 1.2 激光辐射对生物组织的作用.....	(13)
§ 1.3 激光对视觉器官的作用特征.....	(17)
第二章 激光辐射剂量检测额定标准、检测方法和手段	(37)
§ 2.1 激光辐射的额定标准.....	(37)
§ 2.2 对剂量测量控制方法和设备的要求.....	(48)
§ 2.3 剂量检测的实际应用.....	(58)
第三章 剂量测量仪器的设计	(66)
§ 3.1 亮度剂量计的光学系统结构原理.....	(66)
§ 3.2 确定眼睛视网膜照度的剂量计光学系统结构的 原理.....	(73)
§ 3.3 激光剂量计的对准和激光辐射源角线度的测量	(82)
§ 3.4 激光剂量计的结构示意图.....	(86)
§ 3.5 激光剂量计的辐射接收器.....	(89)
§ 3.6 以光二极管为基础的测量转换器	(107)
§ 3.7 测量式激光剂量计系统的元件	(115)
§ 3.8 分析式激光剂量计系统的元件	(131)
§ 3.9 标准参数的测量误差	(136)
第四章 激光辐射剂量测定的计算方法	(144)
§ 4.1 激光照射水平和激光危险区	(144)
§ 4.2 激光束的空间参数和能量参数的基本关系	(145)

§ 4.3	大气对激光辐射束的影响	(151)
§ 4.4	由直射激光辐射产生的照射水平和激光危险区域	(154)
§ 4.5	由反射激光辐射建立的照射水平和激光危险区域	(168)
§ 4.6	在大气中由反射辐射建立的照射水平和激光危险区域	(174)
参考文献		(180)

第一章 激光辐射对人体的作用

§ 1.1 不同光谱波段的电磁辐射对人体的作用

地球生物层经常处在地球或是宇宙产生的电磁辐射作用下。电磁辐射的每一频谱波段对地球上生命的发展起着重要作用,并对生物系统的要素继续产生影响。对生物产生作用的电磁辐射水平的急剧增加带来了物质文明的发展。尽管电磁辐射给人类带来了不可估量的财富,然而,对它们无监督的应用也会带来严重的危害。到目前为止,使用非激光的电磁辐射的额定标准、剂量测量技术和安全保障等方面已完成了大量保健卫生试验。因此,有必要在研究各个频谱波段的辐射对人体作用特征的同时,对比各种常规定额标准和剂量检测技术的原理,确定激光剂量测量技术的概念。

我们研究以下频谱波段内的电磁辐射:

波长从 5×10^{-4} 到 0.01nm (γ 射线) 和从 0.01 到 6nm (X 射线) 的电磁电离辐射;

从 0.05 到 $0.4\mu\text{m}$ 的紫外辐射;

从 0.4 到 $0.77\mu\text{m}$ 的可见光辐射;

从 0.77 到 $1000\mu\text{m}$ 的红外辐射;

从 1mm 到 3m 的超高频辐射。

对每个波段的辐射将研究:决定着生物作用的各辐射场特性;电磁辐射对有生命机体的危险器官的吸收特性;机体对辐射的反应,特别是给出最终要确定标准参数绝对数值所采用的危险性判据。

主要是用相应频率的多种量子能来解释电磁辐射作用的特性,量子能量 W_{KB} 为:

$$W_{KB} = hf \quad (1.1)$$

式中 h ——普朗克常数, 等于 $6.62 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 。如果量子能量用电子伏为单位, 辐射波长 λ 用 nm 为单位, 则(1.1)式可转换为

$$W_{KB} = 1240/\lambda \quad (1.2)$$

能使水和氧、氢、氮及碳等原子电离所需最小的量子能量为 $12 \sim 15 \text{eV}^{[66]}$ 。可以将 12eV 的量子能量看作对生物系统电离的下限, 这份能量相应的波长 $\lambda = 100 \text{nm}$ 。电磁辐射量子可以引起物质的原子核变化, 电离物质的原子或电子壳层激发, 取决于能量的数值大小。在生物系统中, 吸收达不到电离能量水平的电磁辐射量子, 可能通过对键的电子传递能量导致分子离解, 以荧光或磷光形式散射激发能量, 形成自由原子团; 或将辐射能量转换成分子振动、转动和平动能量, 即转换成热^[66]。

电磁辐射对有生命的机体作用的生物效应, 与电磁辐射量子的能量有关, 也与辐射向组织渗透的深度——即分子在相互作用过程中吸收能量发生化学变化的能力以及其它一些物理-生物因素等有关。有重要意义的是辐射能量和功率的值。

γ 和 X 射线辐射 X 射线辐射量子能量的下限大约为 10^3eV , γ 辐射量子的能量超过 10^4eV 。这些电磁辐射具有明显的微粒性质, 它们能引起生命分子电离, 形成自由原子或离解分子, 使有机体内发生生物化学变化。电离辐射的生物作用与吸收的能量或辐射在生命组织内形成的离子对的总数、以及表征不同类型辐射的效率的辐射品质因素 Q 有关。这种生物相互作用是以体积放射性效应表现的, 即出现人体本身当代发生变化, 以及组织遗传学变化, 引起下一代出现相同损伤遗传因子。

在电离辐射卫生学中是使用这样一些物理量, 例如吸收辐射剂量 (J/kg), 用库仑每千克或伦琴测量的曝光剂量单位 ($1\text{P} = 0.258 \times 10^{-3} \text{K/kg}$), 考虑到辐射品质因素的当量剂量 ($1\text{rem} = 1\text{J/kg}$, 当 $Q = 1$ 时) 和放射性物质的激活性 (贝克勒尔效应) 等^[50], 以及诸如群剂量和危险性系数一些概念。

根据以下概念规定电离辐射标准:

在某任意小量的剂量作用下, 出现一定的遗传学和远亲体质损

伤的几率；

危险性几率与辐射剂量成线性关系。

据此，规定出最大容许剂量(ПДД)，它是这样一种最低剂量水平，在这种剂量的辐射作用下，完全排除可能引起的各种明显的射线损伤，与遗传学和远亲体质损伤有关的危险性应当很小，并且与利用这些辐射对身体带来的好处相比这是功大于过的。换句话说，所谈的并不是安全的问题，而只是指出允许的辐射水平(剂量)。

每个标准参数值对各危险器官组织——对辐射有相同放射敏感的各器官，不同种类的人是不同的。对于 A 类(全体员工)规定这样的最大允许剂量 A(ПДДa)，其危险性不超过在工业部门公布的，保证有最大的安全程度。对于第一类危险器官最大允许剂量 A 是在 1 年之内为 5rem，在 30 年之内应当不大于 12ПДД⁽⁵⁰⁾。剂量控制是由剂量测量服务企业进行。

对于 B 类(限于居民)最大允许剂量极限 ПДб 是这样确定的，使危险性小于或等于我们遇到的大自然灾害带来危险性(如水灾、地震、陨石掉落等等)。对第 1 危险器官，在 1 年中 ПДб 是 0.5rem，比中等天然放射性本底强度高 5 倍，最大不超过 1 年 0.85rem(印度马德拉斯省的人)。在这种情况下，1 年中此类属剂量为 5×10^5 人·rem，1 年内发白血病的危险性系数为 0.1 到 0.2，即为非放射性因素产生引起白血病数量的 0.1%。企业剂量测量部门与卫生监察机关一起控制 ПДб。要指出的是 ПДДa 和 ПДб 没有考虑自然本底和医疗引入的附加射线量。

对 B 类(全体人员)，根据〔50〕从遗传学意义规定了该类的剂量细则，由苏联卫生部主管部门管辖。

原子工业多年的发展试验和放射负荷量方面的大量统计资料已确定了下面的电离辐射剂量检测程序。

1. 在恒定辐射源(如核反应堆、辐射设备)的卫生保护区和观察区剂量检测和控制是连续进行。

2. 放射性源在封闭的情况下工作时，限于在工作室内测量剂量功率和辐射剂量通量密度。放射性物质工作是开放的或在可能出现

放射性气体和气溶胶的情况下要进行诸如空气污染、面部、手和衣服等检查。此外,还要检查工作区和危险部门空气中的放射性浓度。

根据以上所述,需要制造多种固定使用的和可以携带使用的放射性辐射检测仪,以及个人使用的剂量测量仪。

从研究辐射的类型看, γ 射线和X射线具有最高生物活性。这两种辐射对生命机体作用的积累特性在人的一生之中都有反映。因此,可取1年时间的个人极大容许当量剂量作为基本标准参数,在同等的作用下50年内这个剂量不会引起用各种现代方法可觉察到健康状况的不良变化^[50]。

根据辐射剂量与被观察到的生物效应是成线性关系,以及不存在辐射作用阈值的假说,无论电离辐射小到何等程度(其中包括自然放射本底)都没有绝对安全^[56]。同时,由放射性安全标准对接触电离辐射源的人建立的最大允许当量剂量不是零,而是甚至超过自然放射性本底水平的剂量。

因而,在规定电离辐射标准时,对接触电离辐射工作所具有的危险性是公认的。这种危险性是对于不同职业由社会规定各种标准的。在放射性卫生学中,所用的容许危险性概念可用于有某种危险程度的任何人类活动,其中包括使用激光的工作(参阅§2.1)。

紫外辐射 紫外辐射对人体的生物作用结果是有益的(增进紧张度、晒黑、维生素化的、抗佝偻病的)还是有害的(红斑、致癌的、角膜结膜炎),这与辐射光谱和剂量有关。小剂量紫外辐射是有益作用,照射剂量相当大时可能变成是有害的。

这种辐射主要对皮肤和视觉器官有危险,它对组织的作用明显地表现出非热性^[93]。紫外角膜和结膜在中等剂量的情况下,初始瞬间不出现由辐射作用引起的异样感觉,但过6~12小时之后,由于角膜发炎(角膜炎)而产生不舒服的感觉(“眼睛进沙”)。此效应随着辐射波长缩短而增大。眼睛的角膜和眼房中丰富的水几乎完全吸收了紫外辐射,避免了对眼睛水晶体的损伤。因为角膜的损伤是早在水晶损伤之前发生,所以,可以认为紫外辐射的内障基因行为,不会起实质性的作用^[93]。

$\lambda < 200\text{nm}$ 辐射的危险性实际上是比较小的,因为这个波段的辐射(真空紫外)在空气中通过较短的路程就被吸收掉,容易消耗能量形成臭氧。

下面我们较详细介绍一下紫外辐射的定额标准和剂量测量法的特点。除通用的物理量和单位之外,从估计紫外辐射对生物作用的大小而言,类似于光度学中应用的光学量系统,也适用于专门的生物学系统的有效值和单位。在这个计量系统中,紫外辐射红斑作用、杀菌作用和有益作用的光谱曲线,起着与在光学量单位系统中,单色光辐射相对光谱发光效率曲线相同的作用。用等效单位测量紫外辐射,主要优点在于测量结果往往可以表征其生物效应方面的辐射特征,不管在相互作用光谱内的光谱成分是如何。使用等效量还可以对比在不同条件下得到的研究结果,也建立了独立于辐射源种类的照射标准^[40]。根据这些关系,生物学上出现如红斑的、杀菌的、活体的、光合作用的等名称。

红斑通量单位[erg]等于波长 297nm 、功率 1W 的单色辐射通量密度;红斑照度的单位是 erg/m^2 。

在确定照射皮肤最大容许阈值剂量时需要考虑第一次照射的症状消失之后皮肤的防护反应,因为此时产生同样效应所必须的剂量与第一次阈值剂量相比是有所提高的。以一个工作日照射 8 小时计,紫外辐射最小红斑剂量分别为对于原先没有照射过的皮肤大约是 20 至 $25\text{merg}/\text{cm}^2$,对原先照射过的皮肤为 25 至 $35\text{merg}/\text{cm}^2$,而对于黑色皮肤为 $50\text{merg}/\text{cm}^2$ ^[93]。

结膜上皮较薄,几乎没有角膜层和黑色素粒,这使结膜失去如皮肤所具有的那种保护性能。对紫外辐射,角膜最小剂量为 1.5 至 $3\text{mJ}/\text{cm}^2$,这是根据照射 8 小时的角膜效应得出的。

紫外辐射的职业照射^[80]的美国标准是:

在 315 至 400nm 波段辐射,对无防护的皮肤或眼睛的照射,总辐射通量的面密度是:照射时间为 1000 秒以上的,不得超过 $1.0\text{mW}/\text{cm}^2$;时间 $t \leq 1000$ 秒时,能量曝光应当小于 $1.0\text{J}/\text{cm}^2$ 。

对于单色辐射源或窄光谱带辐射源,波长在 200 至 315nm 波段

的辐射,在一个工作日持续 8 小时照射的话,最大允许水平或剂量列于表 1.1。

表 1.1 紫外照射的最大允许剂量

波 长 (nm)	8 小时 工作日的 照射剂量 mJ/cm ²	相对光 谱效率	波 长 (nm)	8 小时 工作日的 照射剂量 mJ/cm ²	相对光 谱效率
200	100	0.03	270	3	1.0
210	40	0.075	280	3.1	0.88
220	25	0.12	290	4.7	0.64
230	16	0.19	300	10	0.3
240	10	0.3	305	50	0.06
250	7	0.43	310	200	0.015
254	6	0.5	315	1000	0.0013
260	4.6	0.65			

对于发射宽光谱带的辐射源,有效辐射通量密度 E_{eff} 与波长 $\lambda=270\text{nm}$ 的单色辐射源的关系为

$$E_{\text{eff}} = \sum E_{\lambda} S_{\lambda} \Delta\lambda \quad (1.3)$$

式中 E_{λ} ——入射辐射强度的光谱密度,单位 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$; S_{λ} ——相对光谱效率(参阅表 1.1); $\Delta\lambda$ ——光谱带宽度, nm 。

苏联卫生部对长时间作用的紫外辐射照射装置的标准规定,红斑灯的照度是在 1.5 至 $7.5\text{merg}/\text{m}^2$,在一昼夜内的照射剂量是在 12 至 $60\text{merg} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ⁽⁸⁹⁾。因此,根据对紫外辐射有益健康照射的要求建立起来的标准照度比相应的红斑阈值大 4 个数量级。在苏联现在还没有基于红斑阈值水平建立的全体职工的紫外辐射的安全防护标准。

文献[70]分析了现有的紫外辐射测量仪的特性和它们的分类,分类时基本上是按它们测量的量分类的。有各种型号、携带方便的光谱式的(光谱辐射计)和积分式的紫外测量仪。积分式的起先又分成用于测量等效值的和能量值的。用于测量等效值的积分紫外测量仪

称为紫外光度计：尔格计，尔格剂量计，本底计(PTM3—381—73 的术语)。

因此，对于紫外辐射的累积作用和电离作用，也是以规定一个工作日持续 8 小时照射的剂量标准来衡量，以互相交替规律的照度——时间因子表示这样的周期是合宜的。在规定激光紫外辐射波段的标准时也需要考虑紫外辐射生物作用这一特性。此外，在激光剂量中，为了估计各种波长的激光作用产生的危险程度，可以应用类似于上述的生物学计量法。在这种情况下，激光计量计反映的将是正比于不同波长辐射(表 1.1)产生的损伤的相对光谱效率。

可见光辐射 可见光辐射对于人体大多数组织的穿透能力是很小的，但对眼睛的光学介质如角膜、晶状体、玻璃体等例外。可见光辐射对机体的作用是在组织中进行热的或各种光化学过程，对于可见光谱的短波部分来说，则光化学反应是主要的。可见光谱波段短波部分的辐射对人体作用的机理与紫外辐射机理相似。实际上，并不是用视网膜接受紫外辐射的能力来定紫外和可见光辐射之间的界限，而是用眼睛光学介质能透过的光谱波段限来确定的。因此，在讨论对皮肤的作用时，很难在近紫外和可见光谱波段的短波部分之间划定明确的界限。

显然，足够强的可见光辐射对皮肤和眼睛都是有危险的。可见光辐射对皮肤作用的资料很少，还没有正式定出可见光谱波段的电磁辐射照射皮肤的最大容许水平，基于皮肤容许的加热温度或许能作出估计容许水平(如果只限于热作用机理)。

可见光辐射对视觉器官具有很大的危险性，可以说它是一种危险器官。现在，由周围环境介质产生的可见光辐射，以及各种人工光源产生的可见光辐射对视觉器官的危险程度已有大量的研究结果，这些研究结果在一定程度上弄清辐射，其中包括可见光谱波段的激光辐射对视网膜产生的危险性。

可见光辐射的额定标准还是刚刚开始研究。大量属于可见光辐射的文献，主要是针对确定对作某种精细工作所必须的最低照度水平。例如，在 СНиП II - 4-79(卫生标准与规则)《自然光与人工照

明》^[16]中,唯一的限制是辐射源的最大亮度:在接触危险性工作,识别在不透明金属或塑料表面划痕等,由工作表面朝工人眼睛方向镜面反射的发光表面亮度限定为 $4 \times 10^3 \text{kJ/m}^2$ 。

1975 年美国提出建立白表面最大容许亮度,在长时间观察时定为 10^4kJ/m^2 ^[98]。现在美国对于非激光的普通光源安全标准问题,已作了深入的研究。

红外辐射 红外辐射对机体主要是热作用。因为水几乎完全吸收 1 到 $15\mu\text{m}$ 波长的红外辐射,所以大部分生物组织对这个波段的辐射是不透明的。唯一的高透明区域是 0.7 至 $1.4\mu\text{m}$,这些波长的辐射有 20% 可以深入皮肤 5mm。大功率红外辐射对皮肤的病理学作用,与普通热烧伤时产生的现象有本质上的不同。

眼睛的光学介质对 $\lambda = 0.7$ 至 $1.4\mu\text{m}$ 的红外辐射是透明的,并被聚焦到视网膜上。红外激光辐射对视网膜的作用将在 § 1.3 中讨论。从 $\lambda > 1.4\mu\text{m}$ 的红外辐射开始被角膜和晶状体吸收,并使它们发热,以至于形成白内障。

红外辐射对机体的作用不只是局部的,而且也有总体反应。波长愈长,局部反应愈强烈。起主要作用的是眼睛外周复盖物的光学特性—吸收透射的光谱特性。由于近红外辐射穿透组织较深,对机体的作用更为重要。现在还缺少有关红外辐射局部作用额定标准方面的资料,在必要的情况下可以采用红外激光最大容许辐照剂量。文献 [16] 给出了有关红外辐射对人体常见几种作用的数据(参考表 1.2)。

表 1.2 用红外辐射照射人体的容许时间

照 度 (W/m^2)	照射的 容许时间 (s)	照度 (W/m^2)	照射的 容许时间 (s)
560	—	3500	10~30
840	~360	7000	5~11
1400	150~300	8750	3~8
2100	40~60	10500	3~7
2800	30~40	14000	1~5

为确定剂量,测量红外辐射强度使用专门仪器——光辐射计。在实际测量中,热电光辐射计用得最广泛,标度是以 $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ 为单位。

超高频辐射 尽管超高频辐射作用有某些特殊效应,但在规定危险性的标准时,只考虑它的热作用。超高频辐射的量子能量等于 4×10^{-4} 至 $1.2 \times 10^{-6} \text{eV}$,数值是太小了点,它只起改变吸收量子总数的作用,而不可能产生电离。组织内的传导电流和位移电流的损耗产生了热量,对物质作“体积”加热。超高频辐射的生物作用^[47]是由辐射场本身决定的,如生物的动力学因素、频率、时一空结构;照射持续时间;生命体吸收超高频场的程度;由于电磁场的作用释出的热量;相邻组织之间由于血液循环造成的热能再分配状况等。

达到 0.1 至 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 水平的超高频辐射对生物可能产生刺激作用,也可能产生有害作用,辐射场超过 $0.1\text{mW}/\text{cm}^2$ 时会出现生物体生理调节反应,超过 10 至 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 时会出现病理学反应。

热在相邻近组织间不均衡的再分配,成为对于超高频辐射在眼睛和睾丸被危险器官有高灵敏度的重要的因素。用能量密度从 0.12 到 $0.6\text{W}/\text{cm}^2$ 辐射照射家兔眼睛,照射时间分别从 270s 到 5min 就形成白内障。睾丸被加热到温度上升 1°C ,便会产生短期或长期绝育效果。因此,这个器官长时间照射的阈值是 $5\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

当照射功率密度大于 5 至 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以及长期低强度场的作用下,通常会出现不舒适的感觉(疲劳、精神萎靡、神经衰弱、感应性、头昏)。大多数效应是可逆的,一般三四天便可恢复原来的健康状况^[47]。到目前为止遗传后果研究得尚不够。

在规定超高频辐射的标准时,从两个概念为着眼点:在判断超高频辐射的有害性时,美国采用了机体的形态学变化,它是以 SchwanPursol1954 年的工作作为基础;苏联则采用功能性变化作为对有害性判断的着眼点,这是以对超高频辐射的卫生学估计和 3. B. 戈尔东在 1966 年取得的临床生理学资料为基础。判据上的这种差别使得苏联和美国建立的最大允许量(ПДВ)相差 1000 倍(参看表 1.3)。