

河南省科技著作出版资助项目

# 纳秒脉冲技术的 医学应用

NAMIAO MAICHONG JISHU DE  
YIXUE YINGYONG

名誉主编 郑树森

◎主编 陈新华 周琳 余祖江

中原出版传媒集团  
中原传媒股份公司

河南科学技术出版社

# 纳秒脉冲技术的医学应用

名誉主编 郑树森

主 编 陈新华 周 琳 余祖江

河南科学技术出版社

·郑州·

## 图书在版编目(CIP)数据

纳秒脉冲技术的医学应用 / 陈新华, 周琳, 余祖江主编. — 郑州: 河南科学技术出版社, 2018.10

ISBN 978-7-5349-9352-7

I. ①纳… II. ①陈… ②周… ③余… III. ①脉冲技术-应用-医学 IV. ①R312

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第223389号

---

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市经五路66号 邮编: 450002

电话: (0371) 65788613 65788140

网址: [www.hnstp.cn](http://www.hnstp.cn)

策划编辑: 李喜婷 范广红

责任编辑: 李喜婷 卢正阳 郭亚婷

责任校对: 张娇娇

封面设计: 张 伟

责任印制: 张艳芳

印 刷: 河南瑞之光印刷股份有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 11 字数: 256千字

版 次: 2018年10月第1版 2018年10月第1次印刷

定 价: 60.00元

---

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与出版社联系并调换。

## 编委名单

---

名誉主编 郑树森

主 编 陈新华 周 琳 余祖江

副主编 任志刚 谢海洋 孙军辉 吕维敏

编 者 (按姓氏笔画排序)

叶 科 (浙江大学医学院附属第一医院)

包家立 (浙江大学医学院)

吕维敏 (浙江省医疗仪器审评中心)

朱统寅 (浙江大学医学院附属第一医院)

任志刚 (郑州大学第一附属医院)

孙军辉 (浙江大学医学院附属第一医院)

巫彤宁 (中国信息通信研究院)

李从胜 (中国信息通信研究院)

吴 斌 (杭州睿笛生物科技有限公司)

吴李鸣 (浙江大学医学院附属第一医院)

余祖江 (郑州大学第一附属医院)

张 武 [树兰 (杭州) 医院]

张 慧 (杭州师范大学钱江学院)

陈 艺 (浙江大学医学院附属第一医院)

陈永刚 (杭州睿笛生物科技有限公司)

陈光弟 (浙江省生物电磁学重点实验室)

陈春友 (浙江省温岭市第一人民医院)

陈新华 (浙江大学医学院附属第一医院)

陈新梅 (山东中医药大学药学院)  
陈璐艳 (浙江大学医学院附属第一医院)  
苗旭东 (浙江大学医学院附属第二医院)  
林 晨 (杭州睿笛生物科技有限公司)  
林丙义 (浙江大学医学院附属第一医院)  
周 琳 (浙江大学医学院附属第一医院)  
郑树森 (浙江大学医学院附属第一医院)  
崔光莹 (郑州大学第一附属医院)  
彭国平 (浙江大学医学院附属第一医院)  
董晓刚 (新疆医科大学附属肿瘤医院)  
傅佩芬 (浙江大学医学院附属第一医院)  
童 鹰 (浙江大学医学院附属第一医院)  
谢海洋 (浙江大学医学院附属第一医院)  
鲍 彰 (浙江大学医学院附属第一医院)

## 序言一

# 俯首铺就健康路，助力实现中国梦

纳秒脉冲技术这门高功率国防军工技术目前有诸多医学应用，形成了一个崭新的前沿交叉学科。为了更好地对脉冲功率技术进行阐释，引领工程技术前沿进展，更好地造福人类，这本著作以医工信结合的形式，展现了国内外先行者在这一领域的探索成果。

本书的编写团队均来自临床和科研一线，结合各自在国内外的研究经历，历时三年编写完成。编者将脉冲功率技术的医学应用以平实的语言、具体的研究实例，从基础到临床，从概念到应用，逐层分解，娓娓道来。本书内容丰富，逻辑清楚，条理分明，理论与实践一体化，突出转化医学特点，可以作为临床医生及研究人员，医疗器械研发及使用单位相关人员的培训教材或参考用书。

本书意在抛砖引玉，鼓励富有探知精神的医生、工程师、研究人员投入这一领域，为我国精准微创医学的进步贡献力量。

中国工程院院士

鄭樹森

2017年12月

## 序言二

# A New Chapter in Nanosecond Technology

Biologists, physicists and engineers work together to develop diagnostic techniques and bioelectric applications for medical therapies. The ODU laboratory is recognized as the world leader in the area of bioelectric research. The center has demonstrated that high power but low energy electric pulses applied to biological cells can modify cellular functions.

Utilizing specific electric pulses allow for the efficient delivery of molecules such as chemotherapy drugs or DNA to biological cells both in vitro and in vivo. Another set of pulsing conditions can induce apoptosis or cell death. Examples of medical breakthroughs from this research include killing cancer cells and eliminating tumors, enhanced drug or gene delivery, and accelerated wound healing. Plasma (ionized gas), either by itself or in combination with nanosecond electric pulses, disinfects exposed areas of wounds. The use of antennas utilizing picosecond pulsed electric fields can reach internal organs. The technology have been applied in the following fields:

1. Tumor ablation with nanosecond pulsed electric fields with the successful elimination of melanoma and liver cancer in lab mice.
2. Wound healing with activated platelet gel and gene therapy.
3. Cardiovascular induction of angiogenesis in damaged heart tissue.
4. Neurological pain control for people with amputated limbs.
5. Evaluation of cell and protein functions with pulsed electric fields.
6. Imaging of malignancies with pulsed electric fields.
7. Decontamination to destroy bacteria in wounds, food, air and water.
8. NO<sub>x</sub> remediation of locomotive, truck and vehicle emissions.

In the area of cancer therapy the center has eliminated cancer tumors utilizing pulsed electric fields. This approach has been tested in both skin and liver pre-clinical cancer models. Complete regression of treated lesions can be obtained. Longer pulses such as micro or millisecond pulse electric fields can be utilized to deliver plasmid DNA to solid tumors. This approach has been utilized to deliver genes encoding cytokines to stimulate an anti-tumor immune response. Clinical evidence suggests there it is a therapy of medical significance.

Frank Reidy

Director of Frank Reidy Research Center for Bioelectrics

## 译文：

# 薪火相传，继往开来，共写纳秒技术新篇章

生物学家、物理学家和工程师共同合作开发用于医疗疗法的诊断技术和生物电应用。美国欧道明大学的弗兰克·雷迪生物电研究中心是公认的生物电研究领域的世界领先者。最近二十多年的研究已经证明，将高功率的电脉冲应用于生物细胞可以改变细胞功能。

利用特定的微秒电脉冲，可以使化学药物或DNA等分子在体外和体内有效地传递到生物细胞；使用更短的纳秒脉冲则可诱导凋亡或细胞死亡。在医学上的突破性应用包括杀死癌细胞和消除肿瘤，增强药物或基因传递，加速伤口愈合，消毒暴露的伤口区域。使用皮秒脉冲电场的天线可以到达内部器官。目前电脉冲技术已应用于以下领域。

1. 肿瘤消融。
2. 激活血小板凝胶和基因治疗的伤口愈合。
3. 心血管诱导受损心脏组织中的血管生成。
4. 截肢患者的神经痛控制。
5. 用脉冲电场评估细胞和蛋白质功能。
6. 用脉冲电场为恶性肿瘤成像。
7. 去污染，消灭伤口、食物、空气和水中的细菌。
8. 修复污染气体中的氮氧化物。

在癌症治疗领域，纳秒脉冲电场可以消融局部实体肿瘤。这种方法已经在皮肤和肝脏临床前癌症模型中进行了测试。可以利用更长的脉冲（例如微秒或毫秒脉冲电场）将质粒DNA递送到实体瘤。该方法已被用于递送编码细胞因子的基因以刺激抗肿瘤免疫应答。临床证据表明，电脉冲是一种具有医学应用前景的新型技术。

弗兰克·雷迪

弗兰克·雷迪生物电研究中心主任



# 前 言

纳秒脉冲技术是一门新兴的前沿交叉技术科学，起源于英国原子武器研究中心的脉冲功率科学。现在脉冲功率技术成为一门学科在世界范围内迅速发展，现在已达到100 TW的功率水平，并且正向500~1000 TW方向进展。从1976年开始，每两年召开一次电气和电子工程师协会国际脉冲功率会议（institute of electrical and electronics engineers international pulsed power conference, IEEE IPPC），参加人员多达五六百人，每次会议都有论文集刊载世界上该领域的最新研究成果。但国内外迄今没有一部专门著作全面系统地论述该领域的进展，导致纳秒脉冲功率技术教育科普一直落后于研究，专业知识只掌握在少部分理论研究者手中，技术转型应用非常迅速而专科理论体系建设却步履缓慢，该领域的知识亟待进一步梳理细化。为此，本书编者结合国内外脉冲功率技术的最新发展概况，针对其在医药领域的转化和应用，立足我国科研实况，放眼世界最新进展，编写了本书，主导思想是全面系统论述纳秒脉冲的医学应用。

本书介绍了纳秒脉冲的物理原理、硬件基础、关键技术环节，以及在生物医药领域的应用现状。本书主要讲述材料、元件，对“生物电”进行了溯源和内涵定义，阐述了脉冲成形和能量时间压缩的技术原理，不同类型脉冲功率技术中所用的参数和放电特性，并介绍了脉冲电场技术对细胞、组织、动物实验和肿瘤治疗的原理和机制，详细地描述了其在生物、医学、药学三个方面的应用实例和产业化进程的发展前景及应用潜力。

本书编写过程历时三年。其写作特色是紧跟学科前沿，剪系统性强，作者队伍多为临床一线人员；编写过程中多学科协作，获得了国内外同行的专家学者的广泛支持。仪器操作由介入专科医生根据使用体验总结；临床应用均由来自全国多家大型三甲医院临床一线的专科医生根据亲自操作经历汇总；药学应用由我国中医药大学制药专业团队在产学研实践中凝练；电磁生物效应均由生物电磁专家根据几十年的研究经验提炼；仪器部分是由工程师团队撰写，既有产品制作的电子、机械工程师，又有医疗器械检验的专家学者；临床安全部分是由医院管理专家执笔，根据国际医院质量检验标准提出。因此，本书的编写团队具有多学科交叉融合、权威、亲历、时效的特点。

此书可供从事脉冲功率科学技术的研究人员和教学人员参考，也可作为高等院校相关专业本科生或硕士、博士研究生的教科书或参考书，对肿瘤和细胞生物学相关专业人员也具有较高的参考价值。

本书获得传染病防治国家科技重大专项（项目编号：2018ZX10301201）的支持及河南省科学技术厅科技著作出版项目资助（编号：2016014）的支持，特此致谢。

本书编委会

2017年12月于郑州

# 目 录

第一章 生物电研究的历史与现状 .....	1
第一节 生物电研究的历史 .....	1
一、生物电现象 .....	1
二、生物电的定义和分类 .....	1
三、人体生物电的经典应用 .....	2
四、高电压脉冲电场的出现和应用 .....	3
五、以脉冲电场为基础的生物电技术和化疗的结合应用 .....	3
第二节 生物电研究的现状 .....	4
第三节 生物电研究领域重要研究学者 .....	5
第二章 中国生物电磁学发展现状 .....	10
第一节 浙江大学医学院浙江省生物电磁学重点研究实验室 .....	10
第二节 陆军军医大学电磁辐射医学防护教育部重点实验室 .....	11
第三节 中国科学院电工研究所生物电磁学北京市重点实验室 .....	12
第四节 空军军医大学辐射生物学医学研究所 .....	12
第五节 中国科学院强磁场科学中心 .....	13
第六节 中国信息通信研究院环境与安全部 .....	13
第三章 脉冲电场的原理及设备 .....	15
第一节 直流和交流电场治疗肿瘤的原理 .....	15
一、直流电场 .....	15
二、交流电场 .....	16
第二节 脉冲电场治疗肿瘤的物理原理参数及模型 .....	19
一、脉冲电场 .....	19
二、脉冲电场用于肿瘤消融治疗 .....	20
三、脉冲电场治疗肿瘤的物理模型 .....	22
第四章 脉冲电场的类型和产品 .....	27
第一节 脉冲电场肿瘤治疗方法 .....	27
一、手术电刀 .....	27
二、电穿孔技术 .....	27
三、射频消融 .....	27
四、电化学处理 .....	28

五、肿瘤热疗 .....	28
六、纳秒脉冲的治疗 .....	28
第二节 电气设备设计和制作 .....	28
第三节 脉冲电场的治疗计划和数字模型 .....	29
第四节 脉冲发生治疗器 .....	29
<b>第五章 电磁相关医疗器械的临床使用及安全管理 .....</b>	<b>31</b>
第一节 医疗器械的定义及分类 .....	31
一、医疗器械的定义 .....	31
二、医疗器械的分类 .....	31
第二节 医疗器械的风险管理 .....	32
一、风险分析 .....	32
二、风险评估 .....	32
三、风险控制 .....	32
第三节 射频消融设备使用实例 .....	33
一、射频消融设备简述 .....	33
二、射频消融的治疗原理 .....	33
三、射频消融设备的类型及特点 .....	33
四、射频消融设备的安全措施 .....	34
五、射频消融设备的保养维护 .....	35
第四节 医院使用医疗器械的安全原则规定法规 .....	35
<b>第六章 电磁生物效应 .....</b>	<b>38</b>
第一节 脉冲电磁场的频谱特性 .....	38
一、电磁场频谱 .....	38
二、脉冲电磁场频谱 .....	39
第二节 生物介质的电磁特性 .....	43
一、生物介质的电磁物理特性 .....	43
二、极低频电磁场特性 .....	45
三、射频电磁场特性 .....	47
第三节 电磁能量转移 .....	52
一、分子电偶极矩 .....	52
二、外电场和外磁场势能 .....	53
三、海马 ROS 的电磁能量效应 .....	55
第四节 极低频电磁场生物效应 .....	59
一、流行病学调查 .....	59
二、人体志愿者实验 .....	62
三、动物效应 .....	62
四、细胞与分子效应 .....	63
五、生物物理机制 .....	63

六、极低频电磁场的评价与标准 .....	65
第五节 射频电磁场生物效应 .....	66
一、流行病学调查 .....	66
二、人体志愿者实验 .....	68
三、动物效应 .....	68
四、细胞与分子效应 .....	71
五、生物物理机制 .....	74
六、射频电磁场的评价与标准 .....	74
第六节 电磁生物效应的时间响应 .....	75
一、实时电磁场细胞暴露系统 .....	76
二、实时电磁生物效应 .....	80
第七章 脉冲电场引起的细胞物理变化 .....	83
一、细胞膜的变化和充电过程有关 .....	83
二、细胞在电场下的变形 .....	83
三、纳米孔隙对膜张力的影响 .....	83
四、纳秒脉冲电场引起的经孔隙外泄 .....	83
五、电解质浓度的改变与胶体渗透性肿胀 .....	84
六、细胞膜的组成成分影响脉冲电场的作用效果 .....	84
七、脉冲电场引起的焦耳产热 .....	84
八、脉冲电场引起的主要生物物理过程 .....	85
第八章 纳秒脉冲引起的细胞生物变化 .....	87
一、细胞膜通透性的改变 .....	87
二、磷脂酰丝氨酸的转位 .....	88
三、内源性凋亡 .....	88
四、外源性凋亡 .....	88
五、细胞坏死 .....	88
六、细胞自噬 .....	89
七、细胞骨架影响 .....	89
第九章 不可逆性电穿孔技术 .....	90
第一节 不可逆性电穿孔消融肿瘤的原理及优点 .....	90
一、原理 .....	90
二、硬件设备 .....	90
三、消融效应 .....	91
四、优势 .....	91
第二节 不可逆性电穿孔消融肿瘤的临床操作 .....	92
一、IRE适应证和禁忌证 .....	92
二、实施路径 .....	92
三、操作步骤 .....	93

四、并发症 .....	93
第三节 不可逆性电穿孔消融胰腺癌的临床实例 .....	93
一、IRE 消融胰腺癌的背景和现状 .....	93
二、IRE 消融胰腺癌的患者指征 .....	94
三、IRE 随访策略 .....	94
第十章 不可逆性电穿孔消融实体肿瘤 .....	96
第一节 不可逆性电穿孔技术简介 .....	96
一、发展概述 .....	96
二、设备介绍 .....	96
三、治疗原理及特点 .....	96
第二节 不可逆性电穿孔的临床应用 .....	97
一、IRE 在肝脏的临床应用 .....	97
二、IRE 在胰腺的临床应用 .....	98
三、IRE 在前列腺的临床应用 .....	99
四、IRE 在肺的临床应用 .....	100
第十一章 脉冲电场在介入放射消融中的临床应用 .....	103
第一节 介入放射学发展概况 .....	103
第二节 介入放射学的范围 .....	104
一、血管性介入放射学 .....	104
二、经皮活检 .....	104
三、抽吸引流 .....	104
四、其他 .....	104
第三节 临床介入消融的发展和 innovation .....	105
第四节 脉冲电场在临床介入放射消融中的扩展应用 .....	106
第十二章 纳秒脉冲消融骨肉瘤 .....	107
第一节 骨肉瘤治疗研究的现状 .....	107
一、骨肉瘤的临床表现 .....	108
二、骨肉瘤的辅助检查 .....	108
三、骨肉瘤的诊断 .....	108
四、骨肉瘤的并发症 .....	108
五、骨肉瘤的治疗 .....	109
六、骨肉瘤的预后 .....	109
第二节 骨肉瘤多学科综合治疗和微创治疗的进展 .....	109
第三节 纳秒脉冲消融骨肉瘤的实验研究 .....	111
第十三章 脉冲电场消融宫颈癌 .....	115
第一节 宫颈癌治疗研究的现状 .....	115
一、发病机制 .....	116
二、病理基础 .....	116

三、临床症状 .....	116
四、诊断方法 .....	117
五、临床分期 .....	117
六、治疗方法 .....	117
第二节 宫颈癌多学科综合治疗和微创治疗的发展 .....	118
一、腹腔镜微创手术切除 .....	118
二、机器人手术 .....	118
三、不能手术的晚期宫颈癌的治疗 .....	119
第三节 纳秒脉冲消融宫颈癌的实验研究 .....	119
一、单独使用脉冲电场消融宫颈癌 .....	120
二、脉冲电场联合顺铂 .....	120
三、脉冲电场对宫颈癌转移复发能力的影响 .....	121
<b>第十四章 脉冲电场消融乳腺癌</b> .....	<b>123</b>
第一节 乳腺癌的手术治疗 .....	124
一、乳腺癌改良根治术 .....	124
二、乳房单切+前哨淋巴结活检术 .....	124
三、保乳手术 .....	125
第二节 乳腺癌微创手术治疗 .....	125
一、麦默通旋切系统 .....	125
二、消融治疗 .....	126
第三节 乳腺癌的个体化辅助治疗 .....	128
第四节 乳腺癌的化疗 .....	129
一、新辅助化疗 .....	129
二、乳腺癌术后常规辅助化疗 .....	129
三、晚期乳腺癌的治疗性化疗 .....	129
第五节 乳腺癌的靶向治疗 .....	130
第六节 乳腺癌的内分泌治疗 .....	130
第七节 乳腺癌的放疗 .....	131
<b>第十五章 脉冲电场消融胰腺癌</b> .....	<b>132</b>
第一节 胰腺癌的研究现状 .....	132
第二节 胰腺癌微创介入治疗的发展 .....	133
一、腹腔镜在胰腺癌分期和手术可切除性判断的价值 .....	134
二、腹腔镜胰腺癌切除术 .....	134
三、腹腔镜胰腺癌姑息性手术 .....	134
四、机器人辅助腹腔镜胰腺手术 .....	135
五、微创外科胰腺癌的其他治疗 .....	135
第三节 脉冲电场在胰腺癌中的应用 .....	136
<b>第十六章 电磁相关微侵袭神经外科技术</b> .....	<b>139</b>

一、磁共振质子波谱成像 .....	139
二、功能性磁共振成像 .....	140
三、弥散张量成像 .....	140
四、正电子发射断层扫描 .....	140
五、脑磁图 .....	140
六、神经导航系统 .....	141
七、神经内镜技术 .....	141
八、术中磁共振 .....	142
九、术中超声 .....	142
十、术中电生理 .....	143
十一、术中唤醒麻醉 .....	144
十二、脑肿瘤的栓塞治疗 .....	144
十三、脑肿瘤的热疗技术 .....	144
十四、立体定向放射外科技术 .....	145
十五、脑肿瘤的基因和病毒治疗 .....	146
<b>第十七章 电磁相关微创技术在肺癌治疗中的应用 .....</b>	<b>149</b>
第一节 微创物理治疗技术 .....	149
第二节 温度消融技术在肺癌中的应用 .....	149
第三节 脉冲电场消融技术在肺癌中的应用 .....	151
<b>第十八章 神经电刺激技术在神经系统疾病中的应用 .....</b>	<b>153</b>
第一节 脑深部电刺激术 .....	153
一、DBS在帕金森病治疗中的应用 .....	153
二、DBS在肌张力障碍治疗中的应用 .....	154
三、DBS在其他神经系统疾病治疗中的应用 .....	154
第二节 迷走神经电刺激术 .....	155
第三节 骶神经根电刺激术 .....	155
第四节 脊髓电刺激术 .....	156
第五节 经颅直流电刺激技术 .....	157
第六节 神经肌肉电刺激技术 .....	158
第七节 其他神经电刺激技术 .....	158

# 第一章 生物电研究的历史与现状

## 第一节 生物电研究的历史

世界上几乎没有一件事物的发生、变化，不伴随着电现象的产生。生物电现象是指生物机体在进行生理活动时所显示出的电现象。生物电现象普遍存在于自然界和生物体内。细胞是生物电的基本单位，细胞膜电位维持细胞基本功能，电荷不断变化控制细胞静息状态或者兴奋状态，细胞就像“微型发电机”。而生物包括人体是由细胞构成的，只有单个细胞都执行它们的功能，才能维持生物整体的生理功能。

### 一、生物电现象

自然界里的生物电随处可见。很多动物能够产生电流电压来获得猎物和击退天敌。例如有些海鸟的视网膜与脑细胞组织就是一套功能齐全的“生物电路”，视网膜是“生物电雷达”，脑细胞组织是“生物电脑”，所以海鸟能够进海捕鱼，快速出击，准确返回。水中生物电鳗则产生较高电压，电击对手或捕获小鱼。除了动物具有生物电以外，植物体内同样有电。例如含羞草和向日葵的活动，都是因为受到外界触摸或光刺激后，产生生物电流引起植物叶片的机械活动。蜜蜂在活动时，翅膀等部位由于和空气摩擦会带上电荷，这与人们日常生活中穿脱毛衣时摩擦起静电现象类似。蜜蜂体表有一蜡质层可起到绝缘层的作用，使这些累积的电荷不易消失，于是蜜蜂的身体上就形成了一个电场。蜜蜂可以通过感知彼此身体上电场的特征来进行交流。除了用人们熟知的“8字舞”交流之外，蜜蜂还可以利用电场传递信息，形成独特的“打电话”机制。

人体器官都会产生生物电现象，并且以电的形式——动作电位，通过相应的神经纤维把兴奋传导到大脑中枢，大脑中枢以动作电位的方式，把神经冲动信号通过相应的神经纤维传到效应器，从而产生器官或组织的功能活动。

科学家最早在1791年解剖青蛙时发现肌肉中的生物电现象。19世纪，科学家通过电位器检测出神经细胞膜受到刺激后会产生约0.1 V电压。现在科研人员可以利用膜片钳技术准确地测得细胞膜电位，了解细胞膜上的各种电通道，人们得以了解神经细胞和心肌细胞在外界刺激下能产生动作电位，具有传导兴奋的功能。生物电现象使人体生命活动得以正常进行。

### 二、生物电的定义和分类

生物体在生命活动过程中表现的电现象，称为生物电（bioelectricity）现象。



### (一) 膜电位

在可兴奋组织的细胞膜内外，存在着不同的带电离子，内负外正，内外电位差称为膜电位。细胞处于未受刺激时所具有的电势称为“静息电位”；细胞受到刺激时所产生的电势称为“动作电位”。细胞膜内外带电即“极化状态”。细胞对内外环境的刺激而做出反应即“兴奋性”。细胞水平的生物电现象主要有两种表现形式，一种是在安静时所具有的静息电位，另一种是受到刺激时产生的动作电位。

### (二) 静息电位

静息电位指细胞在安静时存在于细胞膜两侧的电位差。静息电位都表现为膜内相对于膜外为负，如规定膜外电位为0，则膜内电位大都在 $-100 \sim -10 \text{ mV}$ 。

细胞在安静（未受刺激）时，膜两侧所保持的内负外正的状态称为膜的极化；静息电位的数值向膜内负值增大的方向变化，称为超极化，相反，静息电位的数值向膜内负值减小的方向变化，称为去极化或除极化；细胞受刺激后，细胞膜先发生去极化，然后再向正常安静时膜内所处的负值恢复，称为复极化。

### (三) 动作电位

动作电位指细胞受到刺激而兴奋时，细胞膜在原来静息电位的基础上发生的一次迅速而短暂的、可向周围扩布的电位波动。在神经纤维上，它一般在 $0.5 \sim 2.0 \text{ ms}$ 的时间内完成，这使它在描记的图形上表现为一次短暂而尖锐的脉冲样变化，称为锋电位。

动作电位的产生过程：神经纤维和肌细胞在安静状态时，其膜的静息电位为 $-90 \sim -70 \text{ mV}$ 。当它们受到一次阈刺激（或阈上刺激）时，膜内原来存在的负电位将迅速消失，并进而变成正电位，即膜内电位由原来的 $-90 \sim -70 \text{ mV}$ 变为 $20 \sim 40 \text{ mV}$ 的水平，由原来的内负外正变为内正外负。这样整个膜内外电位变化的幅度为 $90 \sim 130 \text{ mV}$ ，构成了动作电位的上升支。上升支中零位线以上的部分，称为超射。但是，由刺激引起的这种膜内外电位的倒转只是暂时的，很快就出现了膜内电位的下降，由正值的减小发展到膜内出现刺激前原有的负电位状态，这就构成了动作电位的下降支。

动作电位的特点：①有“全或无”现象。单一神经或肌细胞动作电位的一个重要特点就是刺激若达不到阈值，不会产生动作电位。刺激一旦达到阈值，就会爆发动作电位。动作电位一旦产生，其大小和形状不再随着刺激的强弱和传导距离的远近而改变。②有不应期。由于绝对不应期的存在，动作电位不可能发生融合。

动作电位的产生是细胞兴奋的标志。一旦细胞受到刺激发生兴奋时，便发生一次迅速而短暂的电位波动，这种电位波动可以向它周围扩散开来，这样便形成了“动作电位”。

## 三、人体生物电的经典应用

细胞膜电位这个重大发现帮助人们逐步了解心电规律，发现心脏这个“电源”会发出动作电位变化，并通过特定执行电线传导功能的细胞进行传导并反映到体表。心脏起搏点的电激动引起心脏的机械性收缩，推动血液在全身血管系统中不停地流动。人工心脏起搏器就是模仿心脏起搏点的放电规律，利用外加脉冲电场，释放脉冲电流来刺激心脏，使心脏按一定的频率收缩和舒张，在外界电场帮助下达到人工起搏的目的。