



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102985132 A

(43) 申请公布日 2013. 03. 20

(21) 申请号 201180034876. 2

代理人 张东梅

(22) 申请日 2011. 05. 31

(51) Int. Cl.

(30) 优先权数据

A61N 1/00 (2006. 01)

61/351, 235 2010. 06. 03 US

61/470, 975 2011. 04. 01 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2013. 01. 15

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2011/038606 2011. 05. 31

(87) PCT申请的公布数据

W02011/153164 EN 2011. 12. 08

(71) 申请人 加利福尼亚大学董事会

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 B·鲁宾斯基 G·D·特罗斯扎克

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公
司 31100

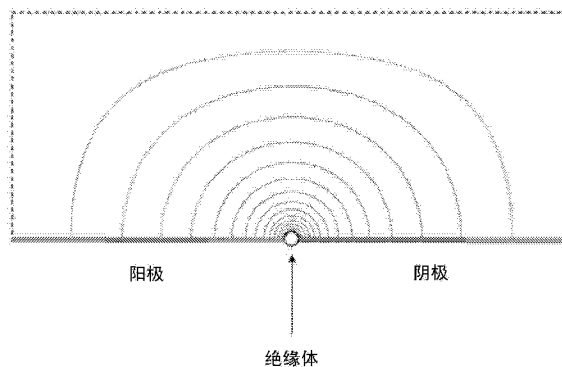
权利要求书 2 页 说明书 22 页 附图 16 页

(54) 发明名称

电穿孔电极构造和方法

(57) 摘要

本文中提供的概念是“基于奇点的构造”电极设计和方法能以电极之间的低电势差在离子物质中产生局部高电场。本文描述的基于奇点的构造包括：阳极电极；阴极电极；以及置于阳极电极和阴极电极之间的绝缘体。基于奇点的电极设计概念涉及其中阳极和阴极彼此相邻、基本共面地放置且由绝缘体分开的电极。基本共面的阳极/绝缘体/阴极构造限制感兴趣的体积的一个表面，并且局部地产生期望的电场，即，在阳极和阴极之间的界面附近。在理想的构造中，阳极和阴极之间的界面尺寸趋向于零，且变为奇点。



1. 一种基于奇点的电极构造,包括:
阳极电极;
阴极电极;以及
置于阳极电极和阴极电极之间的绝缘体,其中阳极电极、绝缘体和阴极电极相对于彼此共面定位。
2. 如权利要求 1 所述的基于奇点的电极构造,其特征在于,还包括:
与阳极电极、绝缘体和阴极电极接触的离子物质。
3. 如权利要求 1 所述的基于奇点的电极构造,其特征在于,所述绝缘体使阳极电极与阴极电极分离 5 纳米至 5 微米。
4. 如权利要求 1 所述的基于奇点的电极构造,其特征在于,所述绝缘体使阳极电极与阴极电极分离 50 纳米至 2 微米。
5. 如权利要求 1 所述的基于奇点的电极构造,其特征在于,所述绝缘体使阳极电极与阴极电极分离约 100 纳米。
6. 如权利要求 1 所述的基于奇点的电极构造,其特征在于,所述绝缘体使阳极电极与阴极电极分离小于 100 纳米。
7. 如权利要求 1 所述的基于奇点的电极构造,其特征在于,还包括:
从下组选择的电源:DC 电源、AC 电源、脉冲电势电源、电流脉冲电源和涉及电极和离子物质的电解液反应;
其中所述电源连接到电极。
8. 如权利要求 1 所述的基于奇点的电极构造,其特征在于,还包括:
从下组选择的感兴趣的物质:包含细胞、体外组织以及体内组织的离子溶液。
9. 一种微电穿孔通道构造,包括:
阳极电极;
阴极电极;以及
置于阳极电极和阴极电极之间的绝缘体,其中阳极电极、绝缘体和阴极电极沿微电穿孔通道的一侧共面定位。
10. 如权利要求 9 所述的微电穿孔通道构造,其特征在于,还包括:在阳极电极、绝缘体和阴极电极上流过通道的电解液。
11. 如权利要求 9 所述的微电穿孔通道构造,其特征在于,所述绝缘体使阳极电极与阴极电极分离 50 纳米至 2 微米。
12. 如权利要求 9 所述的微电穿孔通道构造,其特征在于,还包括:从下组选择的电源:
脉冲电势、AC 电势和涉及电极和离子溶液的电解反应。
13. 如权利要求 12 所述的微电穿孔通道构造,其特征在于,所述离子溶液是包含细胞、活组织或死组织的生理溶液。
14. 如权利要求 9 所述的微电穿孔通道构造,其特征在于,还包括:
相对于第一阳极电极定位在通道的相对侧的第二阳极电极;
相对于第一阴极电极定位在通道的相对侧的第二阴极电极;
置于第二阳极电极和第二阴极电极之间的第二绝缘体,其中第二阳极电极和第二阴极电极相对于彼此共面。

15. 一种微电穿孔的方法,所述方法包括:
提供包括一系列共面的阳极电极和阴极电极的微电穿孔通道,其中相邻的阳极电极和阴极电极由绝缘体分离;
使电解液流过微电穿孔通道;
使细胞流过微电穿孔通道;以及
在相邻的阳极电极和阴极电极之间施加电势差。
16. 如权利要求 15 所述的方法,其特征在于,还包括:
改变流过微电穿孔通道的电解液的流速。
17. 如权利要求 15 所述的方法,其特征在于,所述绝缘体使阳极电极与相邻的阴极电极分离 50 纳米至 2 微米。
18. 如权利要求 15 所述的方法,其特征在于,还包括:
将阳极电极和阴极电极耦合到电源,所述电源选自下组:DC 电源、AC 电源、脉冲电势电源、电流脉冲电源和涉及电极和离子物质的电解液反应;
19. 包括权利要求 15 所述的方法的水消毒方法。
20. 包括权利要求 15 所述的方法的细胞转染方法。

电穿孔电极构造和方法

[0001] 相关申请参照

[0002] 本申请根据 35U. S. C. § 119(e) 要求 2010 年 6 月 3 日提交的美国临时专利申请 No. 61/351, 235 和 2011 年 4 月 1 日提交的美国临时专利申请 No. 61/470, 975 的优先权, 其公开内容通过引用整体结合于此。

[0003] 发明背景

[0004] 电穿孔是由于电场引起的细胞膜脂双层的透化。尽管未完全理解导致电穿孔的物理机制, 但相信电穿孔引发电场显著增加细胞膜处的电势差, 导致形成瞬间或永久的孔。孔形成的范围主要取决于脉冲电场的强度和持续时间, 导致膜透化可逆或不可逆, 作为电穿孔引发电场的强度和时间的函数。可逆电穿孔通常用于将诸如蛋白质、DNA 和药品之类大分子的传送到细胞, 而不可逆电穿孔的破坏特性使其适用于巴氏杀菌或消毒。

[0005] 可逆电穿孔所需的典型电场强度的范围从约 100V/cm 至 450V/cm。在不可逆电穿孔中, 所需的电场范围可从 200V/cm 至高达 60000V/cm。

[0006] 如图 1 所示, 典型的电穿孔设备具有粗略地彼此相对的电极(E)。在典型的电穿孔方法中, 目标细胞被置于电极之间, 将脉冲电压或电流或交流电压或电流施加在电极上以便在电极之间的体积中引发所需的电穿孔电场。产生的相关电穿孔电场粗略地正比于电穿孔电极之间的电势差并且反比于电极(E)之间的距离(d)。在这种典型的电穿孔电极构造中, 电极之间的距离受到待电穿孔的细胞的尺寸的数量级或待电穿孔的体积的尺寸限制。当需要高电场时, 诸如不可逆电穿孔, 传统的设计原理导致需要电穿孔电极两端的高电势差。电极之间的大电势差具有缺点。它们包括需要能够产生这些大电势差并以精确模式传送的电源。这些设备可能制造昂贵并且浪费能源。此外, 大电场所需的电势差通常大到足以导致水电解, 致使电极耗尽和气泡形成或放电, 这些都会不利地影响电穿孔过程。

[0007] 期望开发一种电极构造, 该电极构造能够以电极之间的低电势差传送高电场。

发明内容

[0008] 本文介绍一种新的电极设计原理, 该原理能以电极之间的低电势差实现高电场。中心思想是在奇点产生高电场。因此, 产生奇点的电极构造能以电极之间的低电势差产生高电场。

[0009] 本文中提供的概念是“基于奇点的构造”电极设计和方法能以电极之间的低电势差在离子物质中产生局部高电场。本文描述的基于奇点的构造包括: 阳极电极; 阴极电极; 以及置于阳极电极和阴极电极之间的绝缘体。基于奇点的电极设计概念涉及其中阳极和阴极彼此相邻、基本共面地放置且由绝缘体分开的电极。基本共面的阳极/绝缘体/阴极构造限制感兴趣的体积的一个表面, 并且局部地产生期望的电场, 即, 在阳极和阴极之间的界面附近。在理想的构造中, 阳极和阴极之间的界面尺寸趋向于零, 且变为奇点。

[0010] 使用基于奇点的电极构造的一种可能的方法的示例包括用于电穿孔的设备: (1) 提供包括一系列的共面阳极电极和阴极电极的通道, 其中相邻的阳极电极和阴极电极由绝缘体分离; (2) 使电解液流过微电穿孔通道; (3) 使细胞流过微电穿孔通道; 以及(4) 在相

邻的阳极电极和阴极电极之间施加电势差。使用基于奇点的电极构造的其它电穿孔构造是可能的。对利用基于奇点的电极的局部高电场的其它应用也是可能的。

[0011] 附图简述

[0012] 包含在本文中的附图构成本说明书的一部分。附图与说明书一起还用于解释所介绍的系统和方法的原理,并使本领域的技术人员能够利用所介绍的系统和方法。在附图中,类似的附图标记表示相同或功能相似的元件。

[0013] 图 1 是典型的电穿孔电极构造的示意图。

[0014] 图 2A 是具有由小绝缘体分离的相邻电极的微电穿孔构造的电场流线的示意图。

[0015] 图 2B 是根据本文介绍的一个实施例的电极构造的示意图。

[0016] 图 3 是根据本文介绍的一个实施例的电极构造的制备的示意图。

[0017] 图 4 (a) 是微电穿孔通道构造的示意图。

[0018] 图 4 (b) 示出在不存在细胞的情况下的模型域。

[0019] 图 4 (c) 示出在存在细胞的情况下的模型域。

[0020] 图 5 示出在微电穿孔通道中生成的径向改变的电场。

[0021] 图 6 示出在具有较小高度的微电穿孔通道中存在多大的电场量值。

[0022] 图 7 示出对于小 A 值,大的无量纲电场轮廓更加聚焦,并且跨越微电穿孔通道的整个高度。

[0023] 图 8 示出在存在细胞的情况下,无量纲电场轮廓如何因绝缘细胞膜而被压缩。

[0024] 图 9 示出当细胞半径增加时,细胞如何经历指数增大的无量纲电场量值。

[0025] 图 10 示出模型域中的温度分布。

[0026] 图 11 示出在模型域中流动电解液速率箭头。

[0027] 图 12 示出对于电极之间 0.1V 电势流过 0.6 μm 高微电穿孔通道的肠毒素大肠杆菌 (ETEC, 一种类型的大肠杆菌) 细胞。

[0028] 图 13 示出对于电极之间 0.1V 电势流过 4.2 μm 高微电穿孔通道的酵母细胞。

[0029] 图 14 示出对于减少的无量纲绝缘体长度,作为距绝缘长度的中心线的表面的高度 (Y) 的函数的电场。

[0030] 图 15 示出在大肠杆菌流过通道中的 100 纳米绝缘体时在大肠杆菌上形成的电场。

[0031] 图 16 示出在酵母细胞流过通道中的 100 纳米绝缘体时在酵母细胞上形成的电场。

[0032] 图 17 是示出二次电流分布模型参数的表。

[0033] 图 18 示出对于各相对绝缘体厚度 (I) 和域纵横比 (A) 在 X=0.5, Y=1 处无量纲电场 (NDE) 的量值。

[0034] 图 19 示出在二次电流分布模型中沿绝缘体正上方的中心线的电场量值。

[0035] 图 20 示出对奇点引发的微电穿孔构造的功率输入如何取决于施加的电压和水电导率。

[0036] 图 21 示出直流电穿孔设备。

[0037] 图 22 示出二次电流分布模型域的示意图。

[0038] 图 23 示出沿 y 中心线的电场量值。

[0039] 图 24 示出作为负载电压的函数的功率密度。

具体实施方式

[0040] 本文介绍的是基于奇点的电极构造,其能够在电解液中产生局部高强度电场。在本发明的背景下,奇点是其中在感兴趣的域中或周围且与该感兴趣的域接触的电势分布中存在不连续性的点。在设计极限下,这种不连续性具有零几何尺寸。图 1 与图 2A、2B 之间的比较分别示出先前的电极设计概念(图 1)和当前的概念(图 2A 和 2B)之间的差别。图 1 示出设计成在电解液的体积中产生电场的典型构造。在典型的构造中,感兴趣的体积被限制在电极之间。电场与电极之间的电压差成正比,并且与电极之间的距离成反比。有可能通过减小电极之间的距离和 / 或通过增加电极之间的电势差来增加感兴趣的体积中的电场。原则上,在极限条件下,当电极之间的距离接近零时,可由电极之间的有限电势差产生无限电场。然而,由于感兴趣的体积在电极之间,所以电极之间的距离为零的构造没有效用。

[0041] 在图 2A 和 2B 中示出的新的设计概念建议两个电极基本上置于同一平面,限定感兴趣的电解液体积的表面。阳极和阴极通过绝缘间隙分离。在该构造中,在电解液与阳极 / 绝缘体 / 阴极之间的界面处的局部电场也是绝缘体的尺寸及阳极与阴极之间的电势差的函数。然而,在该构造中,感兴趣的体积限制在电极的外表面上,而不是限制在电极之间。因此,在理想的构造中当绝缘体尺寸极限接近零时,电极之间的界面变为奇点,并且在电解液中,电极之间的无穷小的最后电势差将在奇点处产生无限高的电场。这种构造因此有助于利用小的电势差在感兴趣的体积中生成非常高的电场。图 2A 通过示出从两电极之间的奇点起源的恒定电场线说明这种设计的效用。图 2A 示出受基于奇点的电极影响的体积是真实且可预测的,因此该电极设计可用于以感兴趣的体积中的低电势差产生高电场。

[0042] 微米和纳米技术的进步可用于产生基于奇点的构造。图 3 示出这种设计。该设计基于电绝缘表面,诸如玻璃。诸如金或铂之类的导体通过气相沉积而沉积在玻璃表面上。所沉积的层的厚度的范围从几纳米至数微米。在所沉积的金属中生成至玻璃表面的切口产生电极之间的绝缘间隙。电解液可置于面对两个电极和间隙的结构表面上,且在间隙中产生高电场。

[0043] 聚焦激光束可用于产生切口,其宽度为几微米。很多光刻技术能够产生亚 -100nm 特征,且能用于在微电穿孔通道中形成绝缘体。浸入光刻是一种光刻增强技术,这种技术将折射率大于 1 的液体置于最终透镜与晶片之间。当前的浸入光刻工具能够形成低于 45nm 的特征尺寸。另外,电子束光刻(使用传播电子束的一种光刻)可形成小于 10nm 的特征。

[0044] 可在各种构造下使用图 2A、2B 和 3 中描述的设计。典型的构造通常包括在由小绝缘体分离的两个相邻电极上方放置或流动的电解液。如图 2A 所示,在相邻电极之间施加小的电势差导致从绝缘体起源的径向变化的电场。电场可用于电穿孔悬浮在电解液中的细胞。

[0045] 有很多采用基于奇点的电极设计的可能设计。例如,可用这种材料涂覆搅拌器刀片以保持该刀片的无菌状态。或者,可用这种设计涂覆容器壁以通过产生电场来维持该壁的无菌状态。

[0046] 尽管基于奇点的设计用于电穿孔,然而具有在电解液中以低电势差局部产生高电场的能力的优点可用于深度脑植入、起搏器和其它医疗应用。

[0047] 作为基于奇点的电极的各种可能应用的更详细说明,我们将更详细且作为示例描述“微电穿孔”通道形式的构造。如图 4 (a) 和 5 所示,使构造成镜像并且串联地放置形成

具有多个电场的微电穿孔通道。流过该通道的细胞将经历脉冲电场。可通过改变通道的高度来调节该电场的量值。此外,调节电解液流速改变悬浮在电解液中的细胞经历电场的持续时间。

[0048] 形成二维稳态一次电流分布模型以理解微电穿孔通道几何和细胞尺寸对流动的电解液中的电场的影响。在没有细胞的情况下,降低微电穿孔通道高度导致通道中心中电场量值的指数增加。另外,细胞在其更接近微电穿孔通道壁时经历指数增加的电场量值。

[0049] 所介绍的微电穿孔通道在若干方面不同于传统的宏观电穿孔设备及微电穿孔设备。在具有相对电极的电穿孔设备中,细胞的接近度与其将经历的电场量值无关。相反,在所介绍的微电穿孔通道中,细胞经历的电场量值由细胞和通道壁之间的间隙规定。因为这样,细胞大小不影响实现期望的电场所需的电势差。

[0050] 所介绍的微电穿孔通道和传统的宏观电穿孔设备和微电穿孔设备之间的另一个差别是需要较少的电设备。传统的宏观电穿孔设备和微电穿孔设备需要脉冲发生器和电源。然而,在所介绍的微电穿孔通道中,不需要脉冲发生器,因为它包含一系列相邻电极。此外,因为所介绍的微电穿孔通道仅需要小的电势差,所以需要很小的电源(诸如电池)。

[0051] 电穿孔的简单性使其成为强大的技术。所介绍的微电穿孔通道增加电穿孔的可用性,使其可用于广泛的非传统应用。

[0052] 在一个实施例中,提供微电穿孔通道构造。该通道构造通常包括阳极电极;阴极电极;以及置于阳极电极和阴极电极之间的绝缘体。阳极电极、绝缘体和阴极电极沿微电穿孔通道的一侧定位成共面。该构造还可包括在阳极电极、绝缘体和阴极电极上流过通道的电解液。可提供流速控制系统以改变电解液穿过通道的流量。在一个实施例中,绝缘体将阳极电极与阴极电极分离少于 200nm 或少于 100nm。在另一个实施例中,绝缘体使阳极电极与阴极电极分离约 100nm。还可提供电池电源,避免使用脉冲发生器。

[0053] 在另一个实施例中,微电穿孔通道构造包括相对于第一阳极电极定位在通道的相对侧上的第二阳极电极;相对于第一阴极电极定位在通道的相对侧的第二阴极电极;以及置于第二阳极电极和第二阴极电极之间的第二绝缘体。第二阳极电极和第二阴极电极通常彼此相对共面。这样,电极构造形成通道,其中传递用于电穿孔的细胞。在又一个实施例中,提供一种构造,其中离子物质被包含基于奇点的电极构造的构造限定在一侧,该基于奇点的电极构造是离子物质置于其上的平板或基本平板形式的。

[0054] 在另一个实施例中,提供一种构造,其中离子物质被基于奇点的电极构造围绕,该基于奇点的电极构造是离子物质被设置于其中或穿过其中流动的通道或容器形式的。在奇点处的电场可适用于在离子物质的细胞中产生可逆或不可逆电穿孔。可逆电场从 50V/cm 至 1000V/cm、100V/cm 至 450V/cm、DC 或 AC。不可逆电场从 50V/cm 至 100,000V/cm、从 200V/cm 至 30kV/cm。

[0055] 在又一个实施例中,提供电穿孔的方法。该方法一般包括:(1)提供包括一系列的共面阳极电极和阴极电极的微电穿孔通道,其中相邻的阳极电极和阴极电极由绝缘体分离;(2)使电解液流过微电穿孔通道;(3)使细胞流过微电穿孔通道;以及(4)在相邻的阳极电极和阴极电极之间施加电势差。该方法可以进一步包括:(5)改变电解液穿过微电穿孔通道的流速;以及(6)将阳极电极和阴极电极耦合到电池电源。每个绝缘体可使阳极电极与阴极电极分离小于 200nm 或小于 100nm 或约 100nm。这种方法可用于诸如水消毒或细

胞转染的应用。

[0056] 在另一个实施例中,提供微电穿孔通道构造,包括:阳极电极;阴极电极;以及置于阳极电极和阴极电极之间的绝缘体,其中阳极电极、绝缘体和阴极电极沿微电穿孔通道的一侧共面定位。然后可提供在阳极电极、绝缘体和阴极电极上流过通道的电解液。绝缘体可使阳极电极与阴极电极分离 5 纳米至 2 微米。该微电穿孔通道构造还可包括选自下组的电源:脉冲电势、AC 电势和涉及电极和离子溶液的电解反应。离子溶液可以是包含细胞、活组织或死组织的生理溶液。在一个实施例中,电源耦合到电极且配置成传递适当的电流供应以便形成适当的电场。可调节电场以满足应用(例如,可逆电穿孔或不可逆电穿孔)。在一个实施例中,施加用于不可逆电穿孔的电场,而不导致对感兴趣的细胞的热损伤。

[0057] 传统的宏观电穿孔或微电穿孔具有缺点,这些缺点可由所介绍的微电穿孔通道解决。由于在宏观电穿孔中处理大量细胞,所以细胞透化的程度贯穿整体变化。尽管微电穿孔解决该问题,但它通常导致较低的通过量。所介绍的微电穿孔通道中的聚焦电场可利用通道几何形状来修改,提供了比宏观电穿孔设备更好的细胞透化控制。另外,通道的流过特性使其适用于处理大量细胞。

[0058] 由所介绍的微电穿孔通道解决的另一个缺点是在传统宏观电穿孔设备和微电穿孔设备中对大的电解引发的电势差的需求。大多数宏观和微电穿孔设备具有相对电极,这导致与其分离距离成反比的均匀电场。尽管微电穿孔设备中的分离距离显著小于典型的电穿孔设备的分离距离,但它们受到细胞尺寸的限制。因此,需要大的电解引发的电势差来生成期望的电场。所介绍的微电穿孔通道包含由小的绝缘体分离的一系列相邻电极。施加小的非电解引发的电势差导致从小的绝缘体起源的一系列径向变化的电场。因此,仅需要小电源(诸如电池)。减少所选的电设备使得电穿孔可用于广泛的应用。

[0059] 电势应用

[0060] 无量纲模型示出各种尺寸的细胞可通过调节微电穿孔通道高度经历各种电场量值。此外,电解液流速可用于控制暴露时间。这些参数在细胞透化程度上实现大量控制,而不需要复杂的电设备,从而使这种概念能用于很多潜在的应用,包括水消毒和细胞转染。

[0061] 水消毒

[0062] 受污染的水可导致很多疾病,包括痢疾,占全球 4% 的死亡(220 万)。在发展中国家,这些死亡中的大多数发生在 5 岁以下的儿童中,并且代表该年龄下所有儿童死亡的约 15%。估计卫生和清洁干预将减少痢疾感染约四分之一至三分之一;然而,这需要使用消毒水,而消毒水是稀少的,尤其是在发展中国家的农村地区中。

[0063] 肠毒素大肠杆菌(ETEC,一种类型的大肠杆菌) $2\ \mu\text{m}$ 长、 $0.5\ \mu\text{m}$ 直径、杆状粪大肠杆菌,且是发展中国家痢疾的主导细菌原因。当前,接种疫苗是预防由 ETEC 导致的痢疾的最有效方法。然而,在 ETEC 是地方病的发展中国家,疫苗不可用。

[0064] 利用本文介绍的概念可利用不可逆电穿孔破坏 ETEC。一次电流分布模型的结果示出在流过在相邻电极之间具有 0.1V 电势差的 $0.6\ \mu\text{m}$ 高微电穿孔通道的中心的水中的 ETEC 细胞经历 $1000\text{V}/\text{cm}$ 至 $10000\text{V}/\text{cm}$ 间的电场量值,引发不可逆电穿孔(图 12)。应注意,这是保守估计,因为与更接近电极流动的细胞相比,流过通道中心的细胞将经历相对低强度的电场。

[0065] 细胞转染

[0066] 细胞转染是将大分子,主要是核酸和蛋白质引入到细胞的过程。这些大分子通常穿过由诸如电穿孔之类的化学和物理方法在细胞膜中形成的瞬间孔进入细胞。然而,由于该过程的体积性质,很难确定高转染效率和最小细胞死亡的最优电穿孔参数。传统的微电穿孔可解决该问题;然而,传统的微电穿孔不适于处理大量细胞。

[0067] 相反,本文介绍的微电穿孔通道的流过特性使其成为处理很多细胞同时维持对它们经历的电场的控制的理想选择。酵母是广泛用于基因研究的 $4\ \mu\text{m}$ 直径细胞,因为它用作代表性的真核模型的简单细胞。一次电流分布模型尺寸形状示出流过具有电极之间 0.1V 电势的 $4.2\ \mu\text{m}$ 高通道的酵母细胞经历可逆电穿孔引发电场量值,形成细胞转染所需的瞬间孔(图 13)。通过使多个微电穿孔通道在彼此上面层叠,可增加吞吐量同时维持一致电场。

[0068] 示例

[0069] 以下段落用作上述系统的示例实施例。所提供的示例是预言的示例,除非明确另外陈述。

[0070] 示例 1

[0071] 示例 1 的命名

[0072] ϕ = 电势

[0073] ϕ_a = 阳极电势

[0074] ϕ_c = 阴极电势

[0075] ϕ_{diff} = 电极之间的电势差

[0076] L = 有效电极长度

[0077] H = 微电穿孔通道高度的一半

[0078] r = 细胞半径

[0079] Φ = 无量纲电势

[0080] Φ_a = 无量纲阳极电势

[0081] Φ_c = 无量纲阴极电势

[0082] X = 无量纲 x 坐标

[0083] Y = 无量纲 y 坐标

[0084] A = 通道纵横比

[0085] R = 相对细胞半径

[0086] E = 无量纲电场

[0087] T = 温度

[0088] Q_{gen} = 体积热生成

[0089] k = 热导率

[0090] ρ = 密度

[0091] C_p = 恒压比热

[0092] u_x = 速度

[0093] σ = 电导率

[0094] μ = 动力粘度

[0095] p = 压力

[0096] 图 4 (a)是微电穿孔通道构造的示意图。图 4 (b)示出在不存在细胞的情况下的模型域。图 4 (c)示出在存在细胞的情况下的模型域。图 5 示出在微电穿孔通道中生成的径向改变的电场。形成二维稳态一次电流分布模型以理解微电穿孔通道几何和细胞尺寸对流动的电解液中的电场的影 响。一次电流分布模型忽视电极表面处的表面和浓度损耗,仅考虑来自电解液的欧姆损耗的电场效应。因此,一次电流分布模型由拉普拉斯等式控制:

$$[0097] \quad \nabla^2 \phi = 0$$

[0098] 其中 ϕ 是电势。此外,假设电极表面处于恒定电势,形成相邻电极表面处的边界条件:

$$[0099] \quad \phi_a = \phi_{\text{diff}} \text{ 对于 } \{0 < x \leq L/2 \quad y=0\}$$

$$[0100] \quad \phi_c = 0 \text{ 对于 } \{L/2 < x \leq L \quad y=0\}$$

[0101] 其中 ϕ_a 和 ϕ_c 分别是阳极和阴极处的电势, ϕ_{diff} 是它们之间的电势差,且 L 是有效电极长度。剩余的对称边界由以下控制:

[0102]

$$\nabla \phi = 0 \text{ 对于 } \begin{cases} x=0 & 0 < y \leq H \\ x=L & 0 < y \leq H \\ 0 < x \leq L & y=H \end{cases}$$

[0103] 其中 H 是微电穿孔通道的高度的一半。由于细胞膜的绝缘性质,流过微电穿孔通道的细胞被建模为电绝缘边界,等于对称边界。

[0104] 一次电流分布模型的无量纲化

[0105] 一次电流分布模型被无量纲化以分析微电穿孔通道几何和细胞尺寸对电解液中的电场的影 响。在二维笛卡尔坐标中的拉普拉斯等式为:

$$[0106] \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$$

[0107] 将无量纲变量: $\Phi = \phi / \phi_{\text{diff}} \quad X = x/L \quad Y = y/H$

[0108] 代入拉普拉斯等式得到无量纲形式:

$$[0109] \quad \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} + \left(\frac{L}{H}\right)^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} = 0$$

[0110] 定义无量纲几何参数(通道纵横比):

$$[0111] \quad A = \frac{H}{L}$$

[0112] 无量纲拉普拉斯等式变为:

$$[0113] \quad \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} + \frac{1}{A^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} = 0$$

[0114] 将无量纲变量代入边界条件得到:

$$[0115] \quad \Phi_a = 1 \text{ 对于 } \{0 < X \leq 0.5 \quad Y=0\}$$

$$[0116] \quad \Phi_c = 0 \text{ 对于 } \{0.5 < X \leq 1 \quad Y=0\}$$

[0117]

$$\nabla\Phi=0 \text{ 对于 } \left\{ \begin{array}{ll} X=0 & 0<Y\leq 1 \\ X=1 & 0<Y\leq 1 \\ 0<X\leq 1 & Y=1 \end{array} \right\}$$

[0118] 最后,对于球形细胞,无量纲细胞半径(相对细胞半径)定义如下:

$$[0119] \quad R = \frac{r}{H}$$

[0120] 其中 r 是细胞半径。

[0121] 一次电流分布模型的解

[0122] 无量纲一次电流分布模型由通道纵横比(A)和相对细胞半径(R)表征。通过改变一系列模型中的这些参数来执行参数研究。在每个模型中,利用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics3.5a 求解无量纲电势分布。无量纲电场定义为:

$$[0123] \quad \mathbf{E} = \nabla\Phi$$

[0124] 利用无量纲电势分布来计算。

[0125] 细胞最初从模型中排除,以验证有限元解并更好地理解微电穿孔通道几何如何影响电解液中的电场。这些模型仅由通道纵横比来表征,且具有简化的几何形状。该简单的几何形状连同无量纲拉普拉斯等式的同质性质及三个对称边界利用变量分离方法实现解析解。该解析解用于验证有限元解的结果。一旦验证有限元解,将细胞包含在模型中。

[0126] 初步耦合的热模型

[0127] 除一次电流分布模型外,形成初步二维稳态耦合的热模型以确定流动的电解液中的温度分布。三个模型构成耦合的模型:(1)对流和传导模型、(2)一次电流分布模型和(3)纳维-斯托克斯模型。

[0128] 在 x 方向具有传导和对流的二维稳态热等式是

$$[0129] \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{Q_{gen}}{k} - \frac{\rho C_p u}{k} \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

[0130] 其中 T 是温度, k 是热导率, ρ 是密度, C_p 是恒压比热, Q_{gen} 是体积热生成, u 是 x 方向的流速分布。体积热生成项 Q_{gen} 是电解液中的欧姆加热的结果,且在二维上由下式控制:

$$[0131] \quad Q_{gen} = \sigma \left| \frac{\partial\phi}{\partial x} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \right|^2$$

[0132] 其中 σ 是电解液的电导率,而电势分布由一次电流分布模型确定。另外, x 方向上的流速分布 u 通过将纳维-斯托克斯等式应用到两个水平无限平行板之间的稳定流量来确定,得到:

$$[0133] \quad u = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) (y^2 - H^2)$$

[0134] 其中 μ 是电解液的动态速度,而 $\partial p / \partial x$ 是恒定压力梯度。

[0135] 传导和对流模型的边界条件是在左域边界处的恒定温度:

[0136] $T=293K$ 对于 $\{x=0, 0 < y \leq H\}$

[0137] 在通道的底部和中心线处的热绝缘和对称分别为:

[0138] $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ 对于 $\begin{cases} 0 < x \leq L & y = 0 \\ 0 < x \leq L & y = H \end{cases}$

[0139] 以及在右域边界处的连续性：

[0140] $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ 对于 $\{x=L \quad 0 < y \leq H\}$

[0141] 在 COMSOL Multiphysics 3.5a 中, 对于 $2 \mu\text{m}$ 高 ($H = 1 \mu\text{m}$) $10 \mu\text{m}$ 长通道, 以电极之间的 0.1V 电势差及水作为电解液, 求解耦合的热模型。将速率分布作为表达式输入到对流和传导模型中, 其使用一次电流分布模型来确定贯穿模型域的热生成项。模型中使用的参数在以下的表 1 中示出。

[0142] 表 1

				通道
	电势差	Φ_{diff}	V	0.1
	半通道高度	H	μm	1
	有效电极长度	L	μm	10
	压力梯度	$\partial p / \partial x$	$\text{Pa} / \mu\text{m}$	100
[0143]				水
	热导率	k	$\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$	0.58
	密度	ρ	kg / m^3	998.20
	恒压比热	C_p	$\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$	4181.80
	电导率	σ	S / m	$5.5\text{e-}6$
	动态速率	μ	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$8.90\text{e-}4$

[0144] 一次电流分布有限元模型验证

[0145] 利用解析解验证无量纲一次电流分布有限元模型。对于通道纵横比 (A) 在 0.1 至 1 之间的值, 在 MATLAB (R2007a 版本 7.4) 中计算两个解的无量纲电势分布之间的相关系数。对于通道纵横比的所有值, 相关系数为 1, 指示有限元和解析解相等。

[0146] 在没有细胞情况下无量纲一次电流分布模型结果

[0147] 在没有细胞的情况下, 模型仅由通道纵横比 (A) 表征。当通道纵横比减小时, 无量纲电场的量值在微电穿孔通道的中心指数增加。图 6 示出在具有较小高度的微电穿孔通道中存在多大的电场量值。此外, 对于小的通道纵横比, 高量值无量纲电场轮廓更聚焦, 并且跨越通道的高度。图 7 示出对于小 A 值, 大的无量纲电场轮廓更加聚焦, 并且跨越微电穿孔通道的整个高度。

[0148] 在有细胞情况下无量纲一次电流分布模型结果

[0149] 电解液中电场还受细胞存在的影响。由于细胞膜的绝缘性质,电场轮廓被压缩,导致随着相对细胞半径增加(R)细胞经历指数增加的电场量值。图 8 示出在存在细胞的情况下,无量纲电场轮廓如何因绝缘细胞膜而被压缩。图 9 示出当细胞半径增加时,细胞如何经历指数增大的无量纲电场量值。

[0150] 耦合的热模型结果

[0151] 图 10 中示出电解液中的温度分布。在绝缘体处的最大温度为 293.00000059K,且显然存在由于电解液流动引起的对流传热。另外,在图 11 中示出电解液流动的箭头图。对于 1kPa 压差的最大流速(在微电穿孔通道的中心)是 $u_{\max}0.0562\text{m/s}$ 。

[0152] 这些结果显示调节微电穿孔通道高度是在不增加电极之间的电势差的情况下控制流动电解液中的电场量值的范围的一种方式。具有细胞的模型指示细胞约接近通道壁,它们经历的电场量值越高。另外,初步耦合热模型显示流动电解液中的 0.00000059K 温度增加,这不足以导致热细胞损坏。

[0153] 应注意,改变分离相邻电极的绝缘体的长度将影响电解液中的电场。更具体地,通过增加绝缘体的长度会减小贯穿电解液的电场量值。

[0154] 示例 2

[0155] 当电压源之间的绝缘奇点的尺寸趋向于极限 0 时,在本发明讨论的构造中可产生理论最高电场。我们已经使用相同的分析方法来评价绝缘间隙厚度对所产生的电场的影响。结果显示技术上可实现的 100 纳米间隙可产生期望的效果。

[0156] 以类似于先前示例中描述的模型的方式完成这些模型,其中对于纵横比为 0.1 无量纲绝缘长度从 0.01 变化到 0.1 (绝缘长度 / 域长度)。可通过除以纵横比来将无量纲绝缘长度缩小到域高度。图 14 是示出对于不同的绝缘厚度在 $X=0.5$ 处的无量纲电场(EF)强度的图。换言之,图 14 示出对于减少的无量纲绝缘体长度,作为距绝缘长度的中心线的表面的高度 Y 的函数的电场。

[0157] 图 15 示出在大肠杆菌流过通道中的 100 纳米绝缘体时在大肠杆菌上形成的电场。图 15 示出对于大肠杆菌和先前示例的酵母考虑实际绝缘长度的特定应用。结果显示 IRE 和 RE 引发的电场分别以 100nm 绝缘体形成。在这种情况下,有效电极长度是 $5\mu\text{m}$,对结果没有影响。总之,对于大肠杆菌模型, $H=0.3\mu\text{m}$ 、 $L=5\mu\text{m}$ 和 $IL=100\text{nm}$;对于酵母模型, $H=2.1\mu\text{m}$ 、 $L=5\mu\text{m}$ 和 $IL=100\text{nm}$ 。

[0158] 对于酵母的结果在图 16 中给出。图 16 示出在酵母细胞流过通道中的 100 纳米绝缘体时在酵母细胞上形成的电场。

[0159] 示例 3

[0160] 该示例类似于示例 1 和示例 2。然而,示例 3 引入新概念。因为绝缘体两端的电压差可以很小,所以它也可通过由绝缘体分离的两不相似金属之间的电解液产生并通过导电介质电接触。该构造可允许单细胞微电穿孔设备和微电池的空前小型化。此外,尽管每个应用是独立的,但通过组合它们,可在没有功率输入的情况下通过电解执行单细胞微电穿孔。在该过程中,甚至可产生电功率。

[0161] 电化学电池是能够从化学反应传递电能的设备(直流电池),或者相反,能根据电能输入促进化学反应(电解电池)。所有的电化学电池至少由以下构成:(1)发生化学反应的两个电极,(2)用于离子传导的电解液,以及(3)用于连续性的外部导体。在一个电极处

(阳极) 发生氧化(电子损耗), 在另一个电极(阴极) 处发生还原(电子增加)。

[0162] 阳极和阴极均具有取决于它们各自的化学反应的特征电势。这些特征电势的差指示耦合的化学反应能执行的功的量(直流电池) 或倒转耦合的化学反应所需的功的量(电解电池)。在热力学上, 在恒定温度和压力下, 这可通过吉布斯自由能的变化来描述:

$$[0163] \quad \Delta G = -nF \Delta \phi_{\text{电池}}$$

[0164] 其中 n 是所传送的电子的化学计量值, F 是法拉第常数, $\Delta \phi_{\text{电池}}$ 是耦合的反应的电势差。吉布斯自由能的负变化表示化学反应是有利的且能够执行功(直流电池)。相反, 吉布斯自由能的正变化表示需要输入功以进行下去的不利的反应(电解电池)。

[0165] 因为吉布斯自由能是热力学量, 它仅用于描述平衡系统。在操作电化学电池时, 发生电流通过, 这表示系统不平衡。电流通过导致电化学电池中的电势降低, 导致与平衡状态下观察到的偏离的电势差。该偏离被称为过电势且可归因于三种类型的损耗:(1) 表面, (2) 浓度和(3) 欧姆。

[0166] 由于在电极表面处的动力学限制, 而发生表面损耗。这些动力学限制通常受电极表面上的质量传递电子传递、电子传递之前或之后的化学反应以及其它表面反应控制。

[0167] 浓度损耗由质量传输限制导致, 这导致电子表面处电荷载流子的耗尽。该耗尽在电极表面和体电解液之间建立浓度梯度, 导致电势降。

[0168] 欧姆损耗主要与电解液中的离子电流流动相关联。这受欧姆定律控制:

$$[0169] \quad i = -k \nabla \phi$$

[0170] 其中 i 是离子电流, k 是电解液电导率, ϕ 是电势。因此, 对于给定电流, 电解液电导率极大地影响电解液中的欧姆电势降。

[0171] 无功率单电池电穿孔

[0172] 尽管典型的电穿孔和微电穿孔在程序上直接, 但它们均至少需要脉冲发生器和电源, 这限制在实验室或工业装置外技术的可用性。去除这种电设备可允许电穿孔解决小规模、深远的现实问题, 诸如在发展中国家中破坏受污染的水中的病菌。

[0173] 本文介绍的是用于在没有脉冲发生器且最低程度地无外部功率输入的情况下执行电穿孔的电化学电池构造。该电化学电池构造包括流过一系列的由小绝缘体分离的两个相邻、不相似金属电极的电解液。当这种构造处于非平衡状态, 从小绝缘体起源的径向改变的电场存在于流动的电解液中。这些电场将电穿孔悬浮在电解液或生长在表面上的生物细胞。

[0174] 所介绍的概念的核心是利用电解液中的欧姆电势降来执行电穿孔。该欧姆电势降在电解液中建立电场, 它在给定位置被定义为局部电势的负梯度:

$$[0175] \quad E = -\nabla \phi$$

[0176] 因此, 为了最大化电解液中的电场, (1) 电解液中的电势降需要增加或(2) 电势降需要在小距离上发生。在电解电池中, 通过调节输入到系统的能量相对容易地增加电解液中的电势降。然而, 因为该概念的最终目标是在无功率输入的情况下执行电穿孔, 所以需要利用直流电池, 对电解液中的电势降的控制极小。因此, 为了增加电解液中的电场量值, 需要改变电化学电池几何形状。

[0177] 示例 4

[0178] 该示例说明奇点引发的微电穿孔的可行性; 电穿孔构造的目标是通过利用纳米尺

度的绝缘体分离相邻电极使引发电穿孔所需的电势差最小化。具体地,该示例介绍一种研究,其目标是理解在奇点引发的微电穿孔构造中(1)绝缘体厚度和(2)电极动力学对电场分布的影响。在绝缘体厚度足以利用微制造技术来形成的情况下,仍能实行微电穿孔的无量纲一次电流分布模型。此外,具有内部铂电极和水电解液的奇点引发的微电穿孔构造的二次电流分布模型指示电极动力学在需要检验性的大电势差来执行电穿孔的程度上不抑制电荷传递。这些结果指示奇点引发的微电穿孔可用于形成电穿孔系统,该系统消耗最小功率,从而使其适用于诸如水或其它液体的消毒之类的远程应用。

[0179] 该构造称为奇点引发的微电穿孔,其包括在由小绝缘体分离的两个相邻电极上的电解液。在相邻电极之间施加小的电势差导致从小绝缘体起源的径向变化的电场(图 2A)。因为已经示出沿细胞膜的小部分施加电场可引发电穿孔,所以其径向变化的电场可用于电穿孔悬浮在电解液中的细胞。

[0180] 为了实现微电穿孔通道或利用奇点引发的微电穿孔的其它设备,需要进一步分析该构造的实际可行性。理解奇点引发的微电穿孔构造中(1)绝缘体厚度和(2)电极动力学对电场分布的影响是特别重要的。

[0181] 绝缘体是奇点引发的微电穿孔构造的最小特征。因此,它是限制利用奇点引发的微电穿孔构造的设备的实现的因素之一。需要分析奇点引发的微电穿孔构造中绝缘体厚度对电场分布的影响,以确保以微制造技术形成的足够厚的绝缘体可在小电势差下产生电穿孔引发的电场量值。

[0182] 为了仅以最小电源(诸如电池)执行奇点引发的微电穿孔,直流必须经由电化学反应从电极传送到电解液。因此,电极处的电化学反应的动力学可抑制电流传送。对于奇点引发的微电穿孔,受抑制的电流传送的主要暗示是需要禁止性的大电势差来产生电穿孔引发的电场量值。为了确保不是这种情况,需要检查奇点引发的微电穿孔构造中电极动力学对电场量值的影响。

[0183] 在该示例中,我们介绍(1)经修改的无量纲一次电流分布模型以分析绝缘体厚度对微电穿孔通道的影响,以及(2)具有铂电极和水电解液的奇点引发的微电穿孔构造的二次电流分布模型。这些模型的主要目的是进一步评价奇点引发的微电穿孔的可行性。另外,二次电流分布模型用于研究水电导率和所施加的电压对奇点引发的微电穿孔构造的电场分布以及功率输入的影响。

[0184] 用于分析绝缘体厚度对微电穿孔通道的影响的经修改的无量纲一次电流分布模型

[0185] 我们之前开发的二维稳态一次电流分布模型被无量纲化以分析绝缘体厚度对微电穿孔通道的电解液中的电场的影响。

[0186] 因为该模型忽略电极表面处的表面和浓度损耗,所以它由拉普拉斯等式控制:

[0187]

$$\nabla^2 \phi = 0$$

[0188] 其中 ϕ 是电势。此外,假设电极表面处于恒定电势,形成相邻电极表面处的边界条件:

[0189] $\phi_a = \phi_{diff}$

[0190] $\phi_c = 0$

[0191] 其中 ϕ_a 和 ϕ_c 分别是阳极和阴极处的电势, ϕ_{diff} 是它们之间的电势差。其余的边界是绝缘 / 对称边界且由下式控制:

[0192]

$$\nabla\phi=0$$

[0193] 将无量纲变量:

$$[0194] \quad \Phi = \phi / \phi_{diff}; X=x/L; Y=y/H$$

[0195] 代入在二维笛卡尔坐标中的拉普拉斯等式得到:

$$[0196] \quad \frac{\partial^2\Phi}{\partial X^2} + \left(\frac{L}{H}\right)^2 \frac{\partial^2\Phi}{\partial Y^2} = 0$$

[0197] 在以上的关系式中, L 是有效电极长度, 且 H 是微电穿孔通道的高度的一半。定义无量纲几何参数(纵横比):

$$[0198] \quad A = \frac{H}{L}$$

[0199] 无量纲拉普拉斯等式变为:

$$[0200] \quad \frac{\partial^2\Phi}{\partial X^2} + \frac{1}{A^2} \frac{\partial^2\Phi}{\partial Y^2} = 0$$

[0201] 将无量纲变量代入边界条件得到:

$$[0202] \quad \Phi_a = 1; \Phi_r = 0; \nabla\Phi = 0$$

[0203] 最后, 无量纲绝缘体厚度(相对绝缘体厚度)被定义为:

$$[0204] \quad I = \frac{l}{L}$$

[0205] 模型解。

[0206] 无量纲一次电流分布模型由纵横比(A)和相对绝缘体厚度(I)表征。通过改变一系列模型中的 I 和 A 来执行参数研究。在每个模型中, 利用 MATLAB (R2007a 版本 7.4) 中实现的有限差分法求解无量纲电势分布。无量纲电场定义为:

[0207]

$$NDE = \nabla\Phi$$

[0208] 利用无量纲电势分布来计算。

[0209] 奇点引发的微电穿孔的二次电流分布模型

[0210] 开发二维稳态二次电流分布模型以分析电极动力学对奇点引发的微电穿孔的影响。类似于一次电流分布模型, 二次电流分布模型解释来自体电解液中的欧姆损耗的电场影响, 因此受该区域中的拉普拉斯等式(等式 1)控制。然而, 与一次电流分布模型不同, 二次电流分布模型解释电极表面上的动力学损耗。因为动力学损耗强烈依赖于电极表面上的电势, 所以相邻电极表面上的边界条件为:

[0211]

$$j_a = -\sigma \nabla\phi_a = f(\eta_{s,a})$$

[0212]

$$j_c = -\sigma \nabla\phi_c = f(\eta_{s,c})$$

[0213] 其中 j_a 和 j_c 分别是阳极和阴极处的电流密度, σ 是体电解液的电导率, $\eta_{s,a}$ 和

$\eta_{s,c}$ 分别是阳极和阴极处的表面超电势。超电势表示电极表面上与平衡电势的偏离,且被定义为:

$$[0214] \quad \eta = \phi - E^0$$

[0215] 其中 E^0 是标准状态下电化学反应的平衡电势,通常在 1atm 下 293K。

[0216] 电极动力学模型

[0217] 忽略浓度损耗,电极表面上电流和电势之间的关系通常通过巴物勒-伏尔默模型的修改版本描述:

$$[0218] \quad j = j_0 \left[\exp \frac{\alpha_a F \eta_s}{RT} - \exp \frac{-\alpha_c F \eta_s}{RT} \right]$$

[0219] 概念上,第一项描述在给定电势下对净电流的阳极(还原)贡献,而第二项描述对净电流的阴极(氧化)贡献。考虑到这一点,巴物勒-伏尔默模型中的变量是:

[0220] j_0 : 交换电流密度。交换电流密度是阳极和阴极贡献相等,从而不导致净电流的电流密度。

[0221] α_a 和 α_c : 阳极和阴极传递系数,其分别描述发生每个反应所需的能量。

[0222] η_s : 表面超电势,电极电势与其平衡电势的偏离。

[0223] F : 法拉第常数 (96500C/mol)。

[0224] R : 通用气体常数 (8.314J/mol-K)。

[0225] T : 电极反应的温度(K)。

[0226] 通常通过使电流-电势数据拟合巴物勒-伏尔默模型来经验确定交换电流密度、阳极和阴极传递系数。然而,在一些情况下,使电流电势数据拟合更简单的形式(即,线性)更方便。

[0227] 电流密度边界条件的形成。

[0228] 必须将电压施加到细胞悬浮上以生成用于电穿孔的电场。因为由不可逆性引起的电势损耗($E_{\text{损耗}}$),所施加的电压(V_{appl})必须大于电化学电池 [33] 的平衡电势(E_{eq}):

$$[0229] \quad V_{\text{appl}} = E_{\text{eq}} + E_{\text{损耗}}$$

[0230] 电化学电池的平衡电势是标准状态下阳极和阴极还原平衡电势(分别 E_a^0 是和 E_c^0) 之间的差:

$$[0231] \quad E_{\text{eq}} = E_a^0 - E_c^0$$

[0232] 不可逆损耗具有三种分类:1) 来自缓慢电极动力学的表面损耗;2) 由于质量传递限制引起的浓度损耗;以及 3) 电解液中的欧姆损耗。

[0233] 因为在二次电流分布模型中忽略浓度损耗,所以不可逆损耗可表示为:

$$[0234] \quad E_{\text{损耗}} = \eta_{s,a} - \eta_{s,c} + \Delta \phi_{\text{ohm}}$$

[0235] 其中 $\Delta \phi_{\text{ohm}}$ 是电解液中的欧姆损耗,且可进一步分解为:

$$[0236] \quad \Delta \phi_{\text{ohm}} = \phi_a - \phi_c$$

[0237] 组合等式得到:

$$[0238] \quad V_{\text{appl}} = E_{\text{eq}} + \eta_{s,a} - \eta_{s,c} + \phi_a - \phi_c$$

[0239] 它提供了必须施加到电化学电池以补偿不可逆损耗的电压的更详细关系。因为动力学模型提供作为表面超电势的函数的电极表面处的净电流密度,所以上等式可被分割以获得阳极和阴极处的表面超电势:

[0240] $\eta_{s,a} = V_{\text{appl}} - E_{\text{eq}} - \phi_a$

[0241] $\eta_{s,c} = -\phi_c$

[0242] 将这些关系式代入巴物勒-伏尔默等式的经修改版本使阳极和阴极处的表面电势关联于它们相应的电流密度,实现隐式数值解。

[0243]
$$j_a = j_{0,a} \left[\exp \frac{\alpha_{a,a} F \eta_{s,a}}{RT} - \exp \frac{-\alpha_{c,a} F \eta_{s,a}}{RT} \right]$$

[0244]
$$j_c = j_{0,c} \left[\exp \frac{\alpha_{a,c} F \eta_{s,c}}{RT} - \exp \frac{-\alpha_{c,c} F \eta_{s,c}}{RT} \right]$$

[0245] 模型参数。

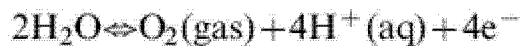
[0246] 在二次电流分布模型中使用的参数在图 17 的表中概述。

[0247] 在图 4(b)中示出二次电流分布模型域。该域 10 微米长,具有 100 纳米厚绝缘体,且 20 微米高。因为先前的结果示出减少域高度指数增加电场量值,所以使域高度足够大以确定在考虑电极动力学时可生成的最小电场量值。

[0248] 因为我们想要使用奇点引发的微电穿孔构造用于水消毒,所以体电解液是水。水的电导率通常在 0.0005 和 0.05S/m 之间变化。

[0249] 阳极和阴极被建模为惰性铂电极。在水中,在电极表面上发生的电化学反应等于水电解中的电化学反应。在阳极,水被氧化:

[0250]



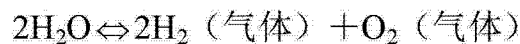
[0251] 在标准条件下,该反应具有还原平衡电势 (E_a^0) 1.23V 和交换电流密度 ($j_{a,0}$) 1028A/m²。另外,假设传递系数 ($\alpha_{a,a}$ 和 $\alpha_{a,c}$) 是 0.5。在阴极,水被还原:

[0252]



[0253] 在标准条件下,该反应具有还原电势 (E_c^0) -0.83V 和交换电流密度 ($j_{c,0}$) 10A/m²。类似于在阳极的水氧化反应,假设传递系数 ($\alpha_{c,a}$ 和 $\alpha_{c,c}$) 是 0.5。因此,在铂水奇点引发的微电穿孔系统中的净反应是:

[0254]



[0255] 在标准条件下,该反应具有平衡电势 (E_{eq}) 2.06V,必须超过该电势以在水中生成电场分布。

[0256] 应注意,因为盐是基于水的溶液,所以这些电化学反应也适用于更传统的电穿孔系统。因此,该二次电流分布模型可容易地修改以通过改变体电解液电导率来分析盐溶液中奇点引发的微电穿孔。

[0257] 模型解。

[0258] 二次电流分布模型受水电解液的电导率和施加到电化学电池的电压 (V_{appl}) 的影响。通过改变一系列模型中的这些参数来执行参数研究。在每个模型中,利用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics4.0a 求解电势分布。电场定义为:

[0259]

$$E = -\nabla\phi$$

[0260] 利用电势分布来计算。此外,通过积分阳极或阴极边界处的电流密度,确定贯穿该模型的总电流(j_{tot})。利用穿过该模型的总电流,计算被定义为:

$$P = j_{tot} V_{appl}$$

[0262] 的功率输入。

[0263] 用于分析绝缘体厚度的影响的无量纲一次电流分布模型

[0264] 无量纲一次电流分布模型的结果示出减少相对绝缘体厚度(I)增加微电穿孔通道的中心处的无量纲电场(NDE)的量值(图 18)。更具体地,由于相对绝缘体厚度引起的无量纲电场量值的增加程度取决于纵横比(A)。在低纵横比下,减少相对绝缘体厚度显著增加无量纲电场。在纵横比为 0.1 下相对绝缘体厚度从 0.9 减小到 0 (奇点)导致无量纲电场量值增加 413%。相反在高纵横比下,减少相对绝缘体厚度几乎不增加无量纲电场。在纵横比为 2 下,相对绝缘体厚度从 0.9 减小到 0 导致无量纲电场量值增加 115%。

[0265] 奇点引发的微电穿孔的二次电流分布模型——水电导率和施加的电压对电场分布的影响。

[0266] 水的电导率和施加的电压(V_{appl})均影响奇点引发的微电穿孔构造中的电场分布。在施加的电压低于 3.2V 时,低电导率水包含比高电导率水显著大的电场量值(图 19)。例如,在施加的电压为 2.7V,水电导率为 0.05、0.005 和 0.0005S/m 时,绝缘体中心的电场量值分别是 0.06、0.38 和 1.64kV/cm。此外,在施加的电压低于 2.8V 时,增加所施加的电压会指数增加水中的电场量值。相反,在施加的电压高于 2.8V 时,电场分布变为恒定且与水电导率无关。在施加的电压为 3.5V,水电导率为 0.05、0.005 和 0.0005S/m 时,绝缘体中心的电场量值分别是 26.4、33.1 和 39.8kV/cm。

[0267] 水电导率和施加的电压对功率输入的影响

[0268] 对奇点引发的微电穿孔构造的功率输入也依赖于水电导率和施加的电压(图 20)。在施加的电压小于 $\sim 2.6V$ 时,功率输入与水电导率无关,且随施加的电压指数增加。例如,在施加的电压为 2.4V,水电导率为 0.05、0.005 和 0.0005S/m 时,奇点引发的微电穿孔构造的功率输入分别为 1.09、1.05 和 $0.92 \times 10^{-5} \mu W/cm^2$ 。相反,在施加的电压大于 $\sim 2.6V$ 时,功率输入变为恒定且高度依赖于水电导率。具有低电导率水(0.0005S/m)的奇点引发的微电穿孔构造需要最小功率输入,在施加的电压为 3.5V 时为 $0.23 \mu W/cm^2$ 。奇点引发的微电穿孔构造所需的功率输入显著增加水电导率。具有 0.005 和 0.05S/m 水电导率的构造分别需要 1.93 和 $16.20 \mu W/cm^2$ 。

[0269] 绝缘体厚度的影响

[0270] 无量纲一次电流分布模型的结果说明微电穿孔通道的实际可行性。在我们先前的工作中,我们预测增加绝缘体厚度将降低贯穿微电穿孔通道的电解液的电场量值。尽管我们的结果定量地支持该预测,但它们也指示可利用以微制造技术形成的足够厚度的绝缘体产生电穿孔引发的电场。例如,在有效电极长度(L)为 10mm,微电穿孔通道高度($2H$)为 2mm,绝缘体厚度(i)为 100nm (对于 $A=0.1, I=0.01$ 的无量纲数据)的微电穿孔通道中施加 0.5V 的电势差可产生超过 10kV/cm 的电场量值,这足以引发不可逆电穿孔。很多光刻技术能够产生亚-100nm 特征,且能用于在微电穿孔通道中形成绝缘体。浸入光刻是一种光刻增强技术,这种技术将折射率大于 1 的液体置于最终透镜与晶片之间。当前的浸入光刻工具

能够形成低于 45nm 的特征尺寸。另外,电子束光刻(使用传播电子束的一种光刻)可形成小于 10nm 的特征。

[0271] 奇点引发的微电穿孔的二次电流分布模型

[0272] 电化学反应必须从电极向电解液传送直流电流以执行奇点引发的微电穿孔。电化学反应的动力学可抑制电流传送并潜在地需要禁止性地大电势差来产生电穿孔引发电场量值。因此,为了充分分析实现奇点引发的微电穿孔系统的可行性,必须理解电极动力学对电场量值的影响。具有铂电极和水电解液的奇点引发的微电穿孔构造的二次电流分布模型考虑电极动力学。该模型的结果:(1)说明实现奇点引发的微电穿孔系统的实际可行性,(2)预测系统的电场量值的上限,以及(3)提供优化获得所需电场分布所需的功率输入的数据。

[0273] 通过具有铂电极和水电解液的二次电流分布模型的结果来说明形成奇点引发的微电穿孔系统的实际可行性。结果显示可利用铂电极在水中生成超过引发可逆(1-3kV/cm)和不可逆(10kV/cm)电穿孔所需的电场的电场。例如,在具有 0.0005S/m 电导率的水中,所施加的电压低至 2.8V (比 E_{eq} 大 0.7V) 可产生足以引发绝缘体表面附近可逆的电穿孔的电场。使所施加的电压增加 0.1V 产生一电场,该电场能引发绝缘体表面附近的不可逆电穿孔和距绝缘体达 $\sim 0.7 \mu m$ 距离的可逆电穿孔。尽管在较高电导率(0.005 或 0.05S/m)水中存在较低电场量值,但施加电压的微小增加导致类似的可逆和不可逆电穿孔引发电场。

[0274] 图 19 所示的趋势指示存在能在奇点引发的微电穿孔系统中产生的电场量值的上限。对于该系统,阳极电化学反应的低交换电流密度 ($j_{0,a}$) 限制穿过系统的电流。结果,当施加的电压增加时,水电导率对电场分布影响较小。此外,在大施加电压下,增加施加的电压几乎不改变电场分布,表明能利用该系统生成的电场量值的上限。接近绝缘体,上限的电场量值高于引发可逆和不可逆电穿孔所需的量值。然而,如果远离绝缘体需要大电场量值,则上限可变为重要的设计考虑因素。

[0275] 奇点引发的微电穿孔的二次电流分布模型可用于优化系统的功率输入。如前所指出的,在大施加电压下,水电导率的影响很小,且电场分布随着施加电场的增加变得恒定(图 19)。图 20 示出当在大施加电压下功率输入变为恒定时,它受水电导率的显著影响。一般而言,低电导率水(0.0005S/m)以最小功率输入产生最大电场量值,而高电导率水(0.05S/m)以最大功率输入产生最小电场量值。因此,减小水电导率是优化系统的功率输入的最有效方法。

[0276] 应注意用于开发奇点引发的微电穿孔的二次电流分布模型的方法可用于建模各种电穿孔设备。利用适当的电极动力学参数,可检测很多电极材料和电穿孔构造。这些模型通过提供贯穿电解液的电场分布可帮助实验研究。另外,它们将有助于用于各种应用的电穿孔系统的优化设计。

[0277] 奇点引发的微电穿孔构造提供优于传统宏观电穿孔设备和微电穿孔设备的很多优点。在具有相对电极的电穿孔设备中,细胞的接近度与其将经历的电场量值大小无关。相反,在奇点引发的微电穿孔构造中,细胞经历的电场量值由细胞和构造表面之间的间隙规定。因为这样,细胞大小不影响实现期望的电场所需的电势差。

[0278] 奇点引发的微电穿孔构造优于传统的宏观电穿孔设备和微电穿孔设备的另一个优点是需要较少的电设备。传统的宏观电穿孔设备和微电穿孔设备需要脉冲发生器和电

源。然而,通过将奇点引发的微电穿孔构造设置成串联,如在微电穿孔通道中所做的那样,就不需要脉冲发生器。此外,如二次电流分布模型所验证的,仅需要小电势差。因此,仅需要最小电源(诸如电池)。

[0279] 通过检查绝缘体厚度和电极动力学对所生成的电场分布的影响来评价奇点引发的微电穿孔系统的实际可行性。开发两个模型以理解这些影响:(1)微电穿孔通道的经修改的无量纲一次电流分布模型以及(2)具有铂电极和水电解液的奇点引发的微电穿孔构造的二次电流分布模型。

[0280] 之前开发的无量纲一次电流分布模型被修改以分析绝缘体厚度对微电穿孔通道的电场分布的影响。增加绝缘体厚度指数减小绝缘体中心正上方的电场量值并抑制电解液中的高强度电场的透过。然而,利用厚度足以利用 MEMS 制造技术来形成的绝缘体,仍能产生高强度电场。因此,绝缘体厚度不抑制形成奇点引发的微电穿孔系统的实际可行性。

[0281] 开发具有铂电极和水电解液的奇点引发的微电穿孔构造的二次电流分布模型以检查电极动力学对水中电场分布的影响。该模型的结果显示可利用铂电极在水中生成超过引发可逆(1-3kV/cm)和不可逆(10kV/cm)电穿孔所需的电场的电场量值。这进一步证实实现奇点引发的微电穿孔设备的实际可行性。另外,二次电流分布模型示出在低施加电压下,在较低电导率水中存在显著大的电场量值。最初,当施加的电压增加时,在水中的电场量值中存在指数增加。然而,在大施加电压下,增加所施加的电压几乎不改变电场量值,不管水电导率如何。此外,在大施加电压下,所需的功率输入高度依赖于水的电导率。因此,可推断低电导率水以最低功率输入产生最大电场量值,而高电导率水以最大功率输入产生最小电场量值。

[0282] 示例 5

[0283] 该示例说明利用奇点引发的毫微电穿孔构造形成自供电(直流)电穿孔设备的可行性。利用该构造,直流电化学电池中的电场可被放大并用于电穿孔。自供电电穿孔设备的二次电流分布模型示出该设备可形成可逆和不可逆电穿孔引发的电场量值,并生成少量功率。所生成的功率也可被获得以用于各种应用。

[0284] 因为奇点引发的毫微电穿孔构造能以小电势差生成高强度电场,所以我们相信它可使用该构造来形成不需要外部电源的电穿孔设备。所介绍的是直流电穿孔设备,称为自供电毫微电穿孔设备。自供电毫微电穿孔设备将使用奇点引发的毫微电穿孔构造来放大由直流电化学电池的电阻电压降形成的电场分布。该电场分布可用于执行电穿孔。

[0285] 电穿孔设备是其目标为使电解液中的电阻电压降最大化以生成较大的电场量值的电化学电池。迄今,所有的电穿孔设备已经成为电解电化学电池——提供电流以生成显著的电阻电压降和所得的电解液中的电场。相反,直流电化学电池将化学反应转换成电流。这些化学反应通常发生在两个不相似的材料电极处,阳极和阴极,其中分布发生氧化和还原。阳极和阴极由在它们之间传导离子电流的电解液来分离。当从直流电化学电池汲取电流时,在电解液中形成小电势分布,导致可用于执行电穿孔的电场(图 21)。

[0286] 这里我们介绍由铝阳极、空气阴极和水电解液形成的自供电毫微电穿孔设备的二次电流分布模型。该模型的主要目的是通过示出电穿孔引发的电场量值的生成来说明自供电的毫微电穿孔的可行性。具体地,模型用于确定水电导率和负载电压对自供电的毫微电穿孔设备中的电场分布的影响。此外,因为自供电的毫微电穿孔设备是直流电化学电池,还

研究了该设备的功率输出。

[0287] 开发二次电流分布模型以确定利用铝-空气化学的自供电毫微电穿孔设备的电场量值和功率输出特性。

[0288] 在图 22 中示出二次电流分布模型域。先前的结果已经显示减小模型域的纵横比显著增加贯穿该域的电场量值。因此,为了使几何电场增强最小化,纵横比为 2 的模型域(对应于域高度和长度分别为 20 和 10 μm 的域)用于二次电流分布模型。另外,使用 100nm 厚绝缘体,其足以利用微制造技术来形成。

[0289] 二次电流分布模型考虑体电解液中的电阻电压降和电极表面处的动力学损耗。因此,体电解液区域受拉普拉斯等式控制:

[0290]

$$\nabla^2 \varphi = 0$$

[0291] 其中 φ 是电势。为了考虑取决于电极表面处的电势的动力学损耗,相邻电极处的边界条件是:

[0292]

$$j_a = -\sigma \nabla \varphi_a = f(\eta_{s,a})$$

[0293]

$$j_c = -\sigma \nabla \varphi_c = f(\eta_{s,c})$$

[0294] 其中 j_a 和 j_c 分别是阳极和阴极处的电流密度, σ 是体电解液的电导率, $\eta_{s,a}$ 和 $\eta_{s,c}$ 分别是阳极和阴极处的表面超电势。超电势表示电极表面上与平衡电势的偏离,且被定义为:

[0295]

$$\eta = \varphi - E^0$$

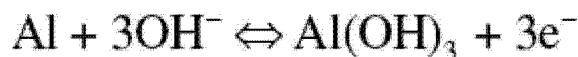
[0296] 其中 E^0 是标准状态下电化学反应的平衡电势,通常在 1atm 下 293K。其余的边界是绝缘/对称边界且由下式控制:

[0297]

$$\nabla \varphi = 0$$

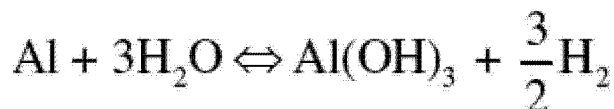
[0298] 电极表面处电流密度和电势之间的关系通常通过拟合实验数据获得。在水中,在铝阳极处的一次电化学反应是:

[0299]



[0300] 此外,在水中,在铝阳极处有附加的寄生反应:

[0301]



[0302] 考虑这些反应,通过使极化曲线拟合巴物勒-伏尔默等式来确定铝阳极的动力学参数:

$$[0303] \quad j_a = j_{0,a} \left[\exp \frac{\alpha_{a,a} F \eta_{s,a}}{RT} - \exp \frac{-\alpha_{a,c} F \eta_{s,a}}{RT} \right]$$

[0304] 概念上, 第一项描述在给定电位下对净电流的阳极(还原)贡献, 而第二项描述对净电流的阴极(氧化)贡献。考虑到这一点, 巴特勒-伏尔默模型中的变量是: $j_{0,a}$: 阳极交换电流密度。交换电流密度是阳极和阴极贡献相等, 从而不导致净电流的电流密度。 $\alpha_{a,a}$ 和 $\alpha_{a,c}$: 在阳极处的阳极和阴极传递系数, 其分别描述发生每个反应所需的能量。

[0305] 术语

[0306] $\eta_{s,a}$: 阳极处的表面超电势, 电极电势与其平衡电势的偏离。

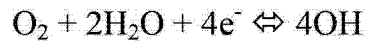
[0307] F : 法拉第常数 (96500C/mol)。

[0308] R : 通用气体常数 (8.314J/mol-K)。

[0309] T : 电极反应的温度 (K)。

[0310] 水中在空气阴极处的电化学反应是:

[0311]



[0312] 通过对于 Yardney AC51 空气阴极线性拟合极化曲线确定对于该反应的电流-电势关系:

$$[0313] \quad j_c = a \eta_{s,c} + b$$

[0314] 对于直流电化学电池, 由于不可逆损耗, 所传递的电压变得更小于电化学电池的平衡电势:

$$[0315] \quad V_{\text{del}} = E_{\text{eq}} - E_{\text{损耗}}$$

[0316] 电化学电池的平衡电势是标准状态下阴极和阳极还原平衡电势(分别 E_a^0 是和 E_c^0) 之间的差:

$$[0317] \quad E_{\text{eq}} = E_c^0 - E_a^0$$

[0318] 不可逆损耗具有三种分类: 1) 来自缓慢电极动力学的表面损耗; 2) 由于质量传递限制引起的浓度损耗; 以及 3) 电解液中的欧姆损耗。

[0319] 因为在二次电流分布模型中忽略浓度损耗, 所以不可逆损耗可表示为:

$$[0320] \quad E_{\text{损耗}} = \eta_{s,a} - \eta_{s,c} + \Delta \phi_{\text{ohm}}$$

[0321] 其中 $\Delta \phi_{\text{ohm}}$ 是电解液中的欧姆损耗, 且可进一步分解为:

$$[0322] \quad \Delta \phi_{\text{ohm}} = \phi_a - \phi_c$$

[0323] 组合等式:

$$[0324] \quad V_{\text{del}} = E_{\text{eq}} - \eta_{s,a} + \eta_{s,c} - \phi_a + \phi_c$$

[0325] 它提供了必须施加到电化学电池以补偿不可逆损耗的电压的更详细关系。因为动力学模型提供作为表面超电势的函数的电极表面处的净电流密度, 所以上等式可被分割以获得阳极和阴极处的表面超电势:

$$[0326] \quad \eta_{s,a} = E_{\text{eq}} - V_{\text{del}} - \phi_a$$

$$[0327] \quad \eta_{s,c} = -\phi_c$$

[0328] 将等式分别代入阳极和阴极的电流-电势关系实现隐式数值解。

[0329] 二次电流分布模型的结果受体电解液的电导率 (α) 和负载电压 ($V_{\text{负载}}$) 的影响,

其调节从设备汲取的电流的量(降低负载电压增加电流汲取)。通过改变一系列模型中的电导率和负载电压来执行参数研究。表 2 包含在二次电流分布模型中使用的参数。

[0330] 表 2 二次电流分布模型参数。

[0331]

全局		
F	C/mol	96500
R	J/mol-K	8.314
T	K	298
E_{eq}	V	1.41
V_{appl}	V	0.5-1.4
σ	S/m	5e-4, 5e-3, 5e-2
阳极		
$j_{0,a}$	A/m ²	816.87
$\alpha_{a,a}$	-	0.08767
$\alpha_{c,a}$	-	0.2134
阴极		
a	A/m ² -V	2270
b	A/m ²	-24.2

[0332] 在每个模型中,利用有限元分析软件COMSOL Multiphysics4.0a求解电势分布。电场定义为:

$$[0333] \quad E = \nabla \phi$$

[0334] 利用电势分布来计算。此外,通过积分阳极和阴极边界处的电流密度,确定贯穿该模型域的总电流。利用穿过该域的总电流,计算被定义为:

$$[0335] \quad P = j_{tot} V_{del}$$

[0336] 的功率输出。

[0337] 每个电穿孔设备的目标是生成能够引发电穿孔的电池量值,其需要电解液中的显著电阻电压降。关于自供电的毫微电穿孔构造,(1)减小电导率(σ)和(2)减小负载电压(V 负载)(增加来自该构造的电流汲取)增加电解液中的电阻电压降。

[0338] 二次电流分布模型示出降低电解液电导率增加自供电的毫微电穿孔构造中的电场量值(图 23)。在电导率为 5e-2S/m 的水中不能生成电穿孔引发的电场量值。然而,电导率为 5e-3S/m 的水能够在小于 1.2V 的负载电压下产生可逆电穿孔引发的电场量值(>1kV/cm²¹)。在电导率为 5e-4S/m 的水中存在最大的电场量值。在该电导率下,高达 1.3V 的负载电压导致最大电场量值为 2.68kV/cm。此外,在 0.9V 的负载电压下,电导率为 5e-4S/m 的构造中的最大电场为 13.12kV/cm,它大于引发不可逆电穿孔所需的电场量值(>10kV/cm²¹)。

[0339] 对于给定的电导率,二次电流分布模型示出降低负载电压(增加从自供电的毫微电穿孔构造汲取的电流密度)增加电解液中的电场量值(图 23)。在 0.9 和 0.7V 的负载电压下在电导率为 $5e-3S/m$ 的水中可分别生成 3.48 和 4.82kV/cm 的最大电场量值。然而,在较低电导率下,相同的负载电压生成显著更大的电场量值。电导率为 $5e-4S/m$ 的水能够在 0.9 和 0.7V 的负载电压下分别生成 13.2 和 18.2kV/cm 的最大电场量值。可通过检查自供电毫微电穿孔构造中的电势损耗源来解释水电导率之间的电场量值的差异的原因。在利用电导率为 $5e-3S/m$ 的水的构造中,电解液中的电阻电压降不是该构造中的主要电势损耗。空气阴极不可相对于阳极极化。因此,为了维持在电解液中生成电场所需的大电流,在阴极表面上必须存在大的超电势。对于该情况,阴极处的超电势是该构造中的主要电势降。具有电导率为 $5e-4S/m$ 的水的构造不是这种情况,其中主要的电势损耗是电解液中的电阻电压降,其导致较大的电场量值。

[0340] 因为自供电的电穿孔构造是直流电化学电池,所以它还可生成少量功率(图 24)。图 24 不包括用于 $5e-2S/m$ 水的功率输出数据,因此它不能生成电穿孔引发的电场量值。尽管发电不是该构造的主要目的,但其产生的功率可用于 MEMS 应用。如所预期的那样,利用 $5e-3S/m$ 水的构造产生最大功率,而利用 $5e-4S/m$ 水的构造产生最小功率。对于两种导电率,最大功率输出均发生在 0.7V 的负载电压下。在该负载电压下,分别在 $5e-3$ 和 $5e-4S/m$ 水中产生 163.07 和 31.85mW/cm² 的功率输出密度。因此,正如所预期的那样,导致最大电场量值的构造也产生最小功率。然而,可优化该构造以满足一组给定的电场和功率输出要求。

[0341] 应注意,对于 $5e-3S/m$ 电导率水预测的功率输出可高于实验中所观察到的。用于空气阴极的极化数据仅达到 60mA/cm²,且在 $5e-3S/m$ 电导率下,由该设备在低负载电压下生成的电流超过该值。因此,对于这些情况,外推在空气阴极处的极化数据。 $5e-4S/m$ 电导率水的电流密度不会超过 60mA/cm²。

[0342] 开发由铝电极、空气阴极和水电解液形成的自供电毫微电穿孔设备的二次电流分布模型,以评价自供电的毫微电穿孔的理论可行性。该模型表明自供电的毫微电穿孔在理论上可行。在充分低的电解液导电率下,铝-空气化学能够生成可逆和不可逆电穿孔引发的电场量值。另外,对于给定的电解液导电率,降低自供电毫微电穿孔设备的负载电压(增加从自供电毫微电穿孔设备汲取的电流)增加电解液中的电场量值。最后,可从自供电电穿孔设备生成少量功率。

[0343] 结论

[0344] 介绍前面本发明的描述只是为了说明和描述。它并不旨在穷尽,或将本发明限于所公开的准确形式。根据上述示教,许多修改和变化是可能的。选择和描述了这些实施例以最清楚地说明本发明的原理及其实际应用,从而使本领域普通技术人员能按照各个实施例以及适合所构想的特定用途的各种修改来最好地利用本发明。旨在将所附权利要求书解释为包含本发明的其它替换实施例;包括等价结构、组件、方法和装置。

[0345] 应意识到详细的描述部分而不是发明内容部分和摘要部分旨在用于解释权利要求书。发明内容和摘要部分可阐述本发明人构想的本发明的一个或多个实施例而不是所有的示例性实施例,因此不旨在以任何方式限制本发明和所附权利要求书。

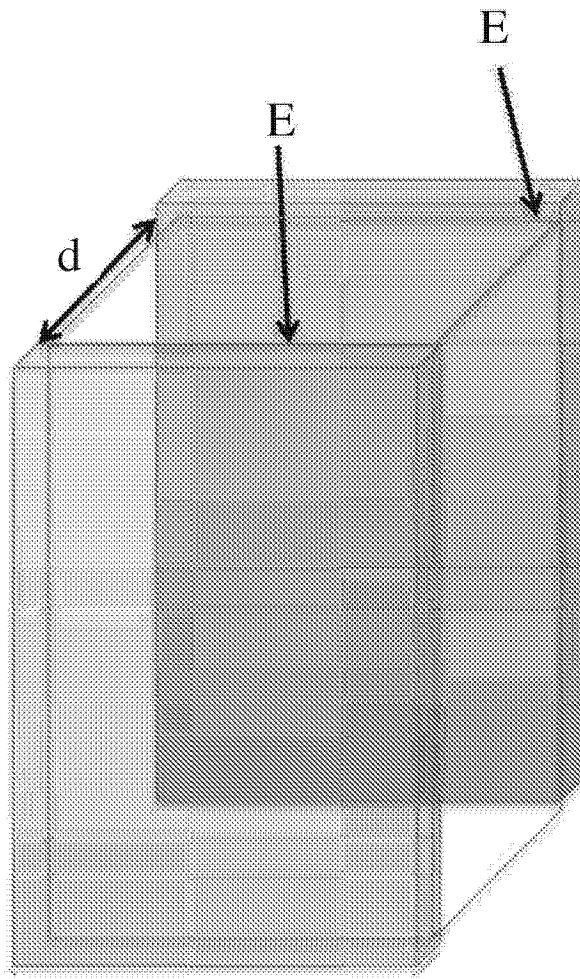


图 1 现有技术

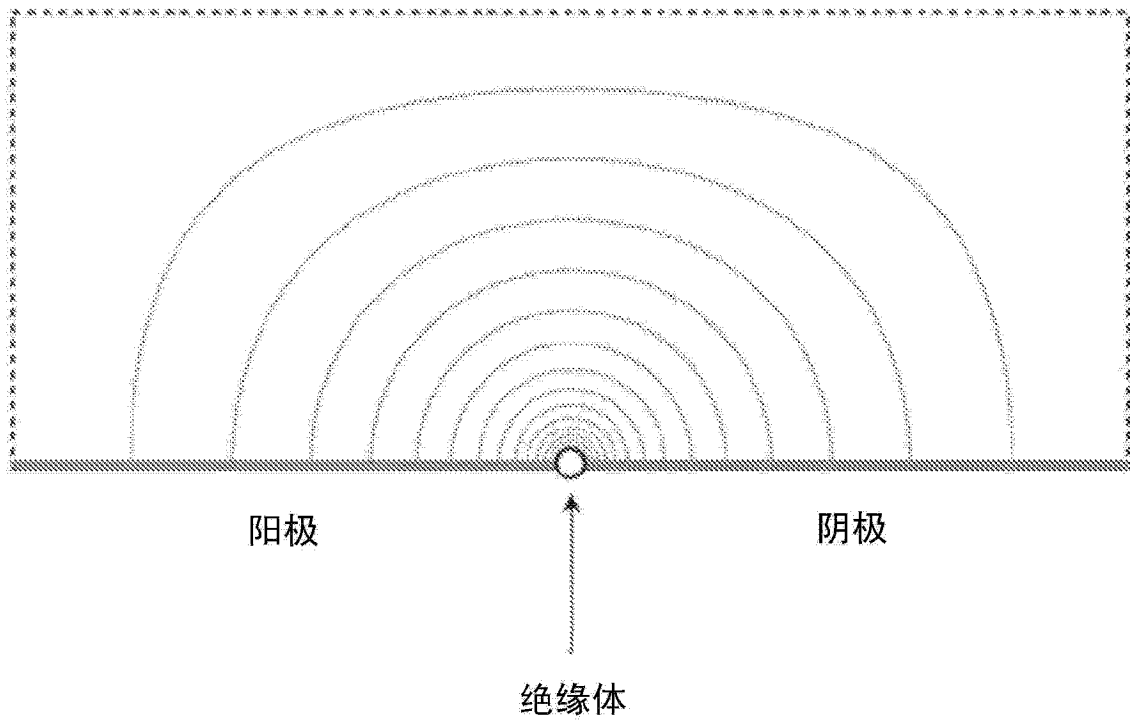


图 2A

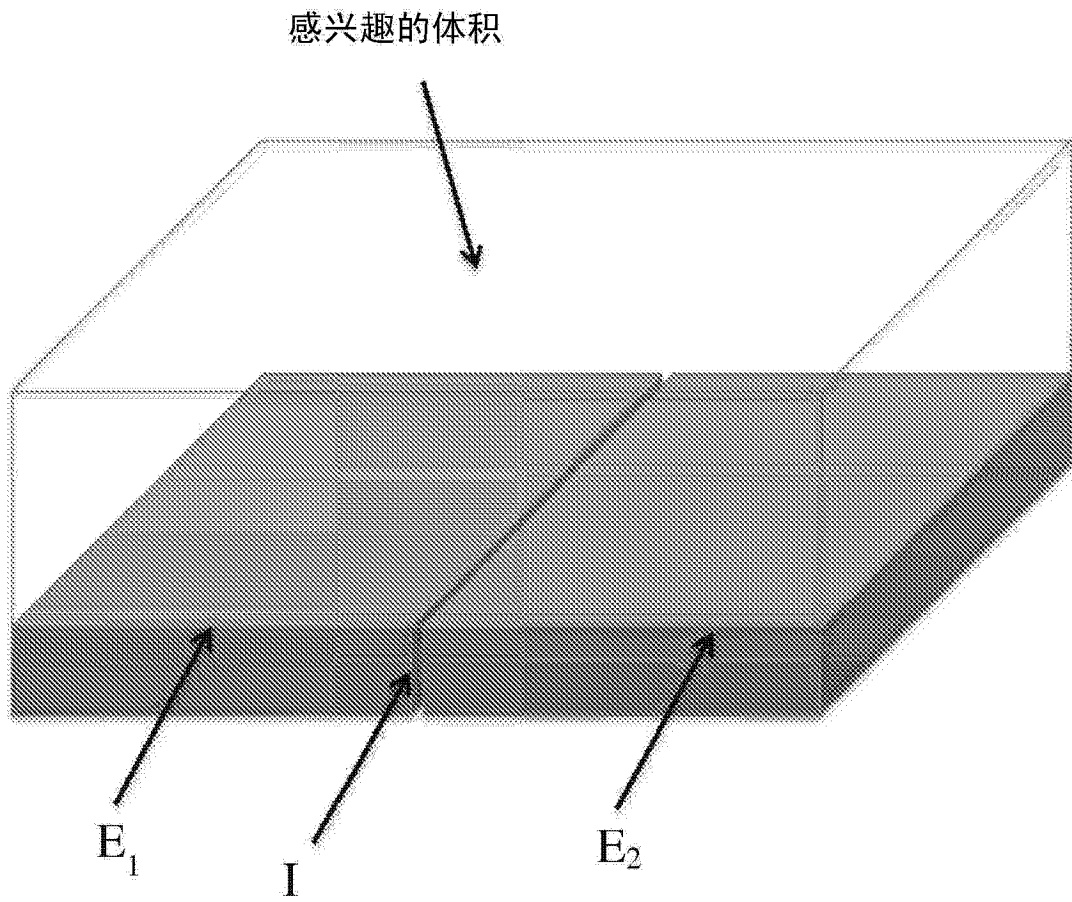


图 2B

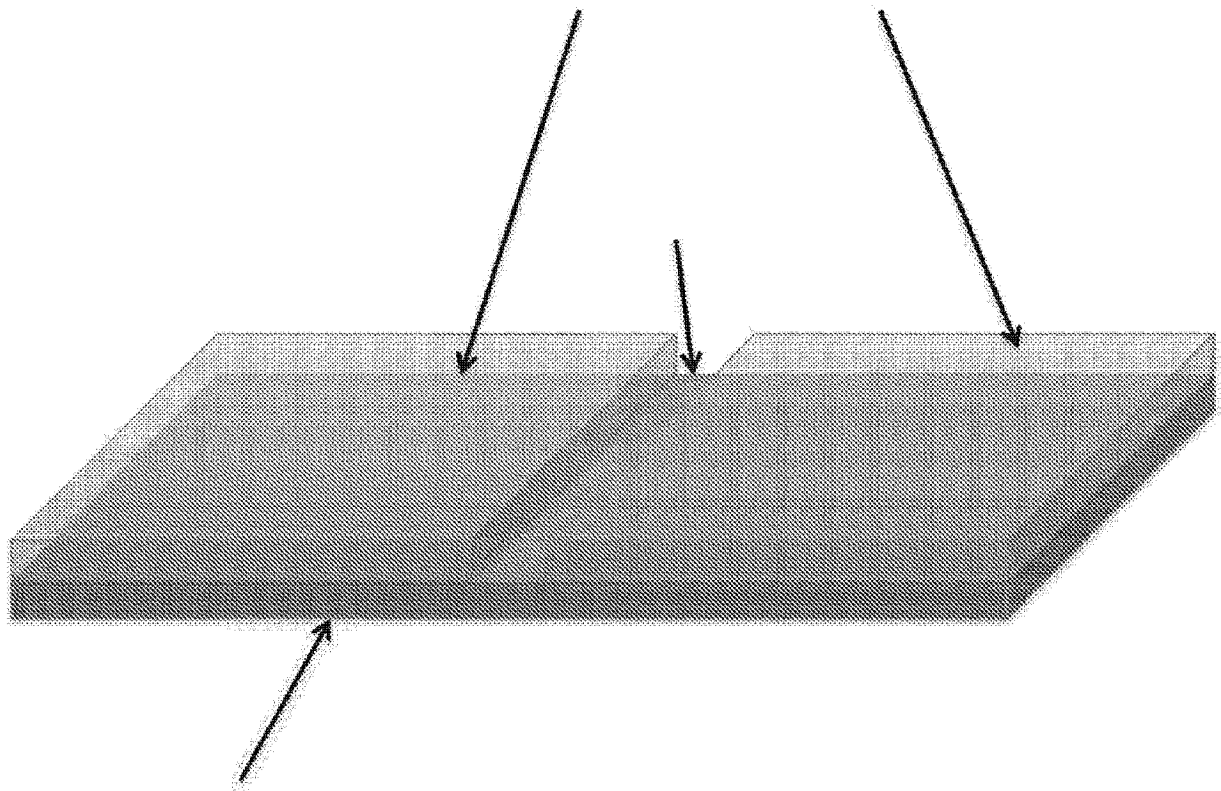


图 3

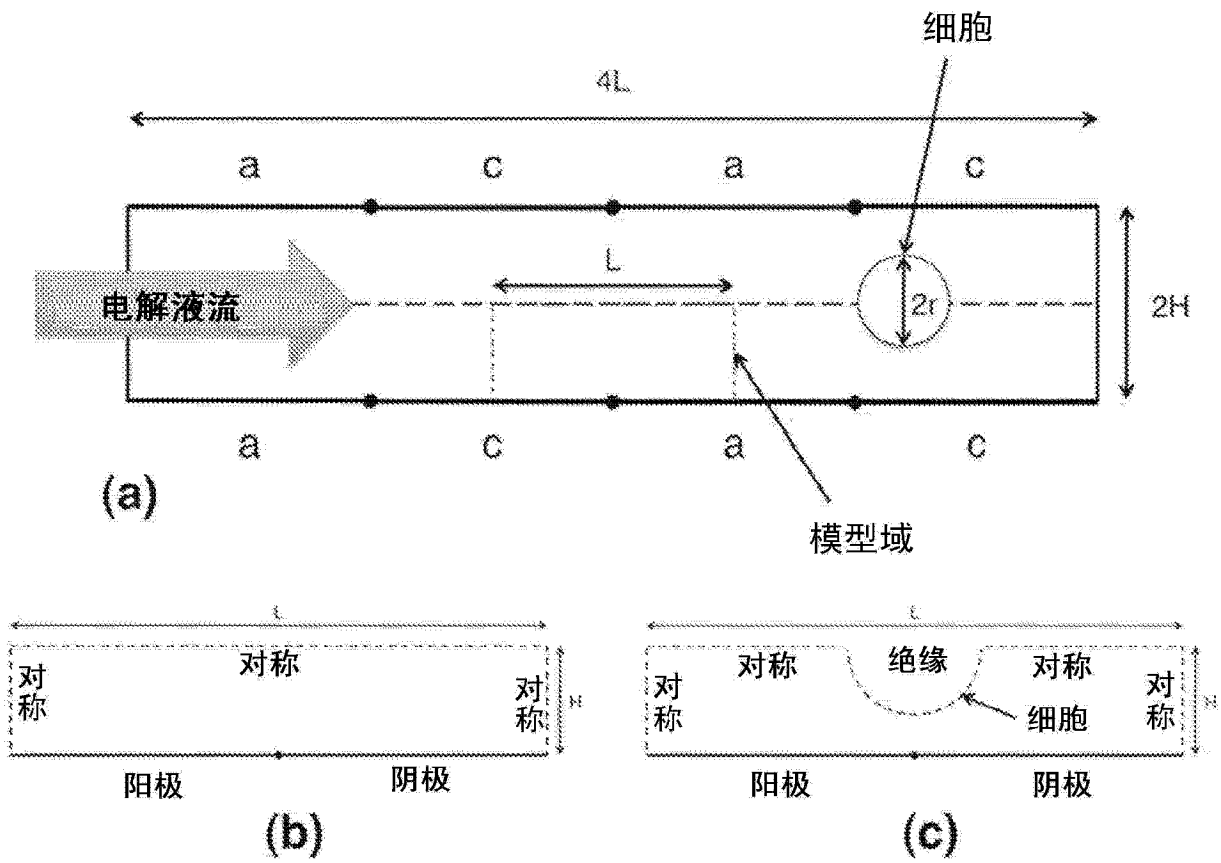


图 4

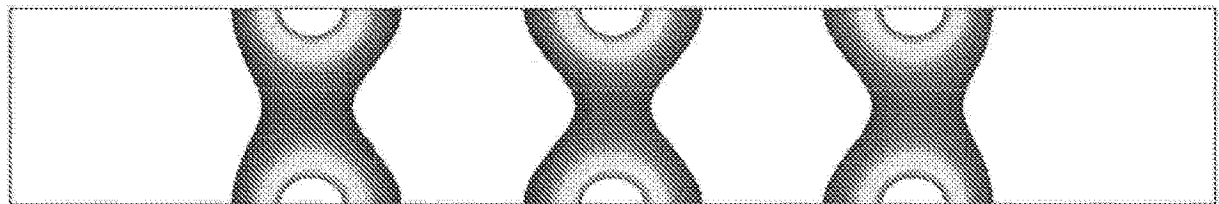


图 5

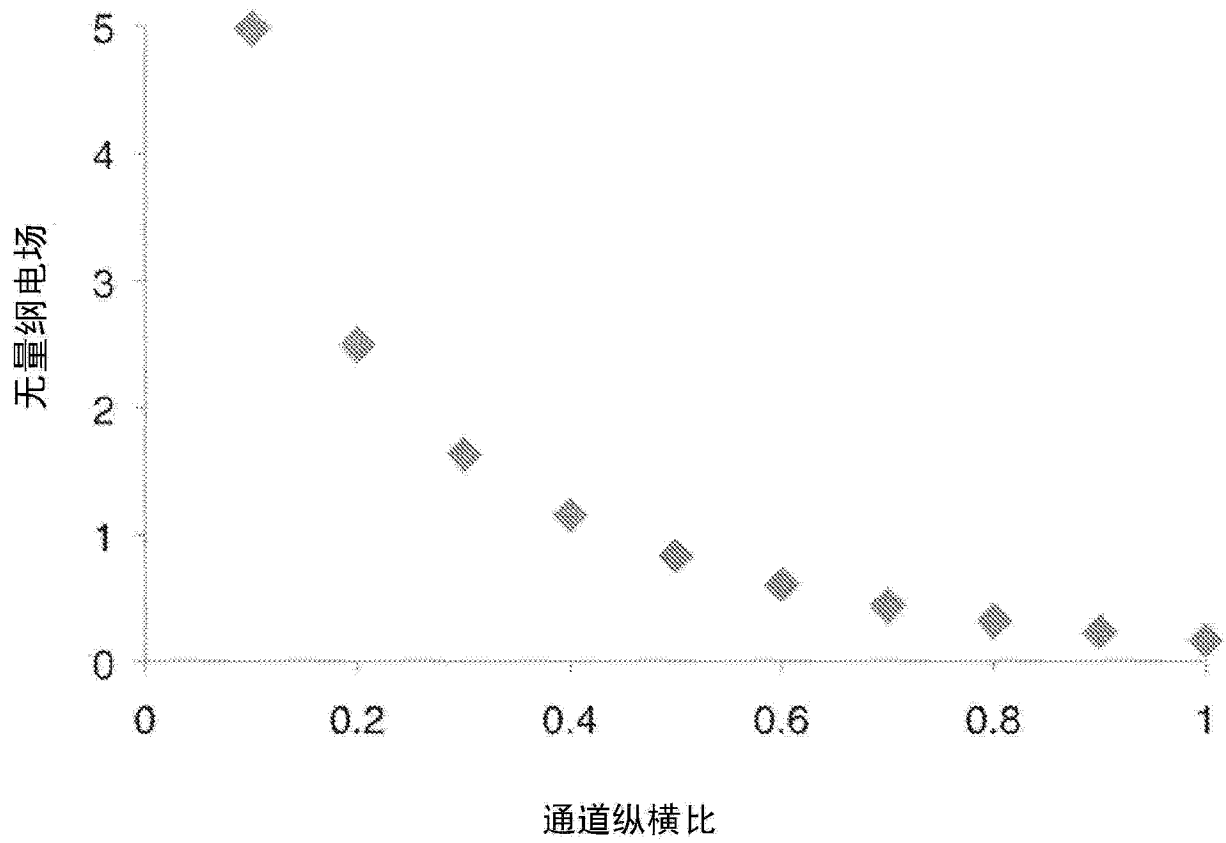


图 6

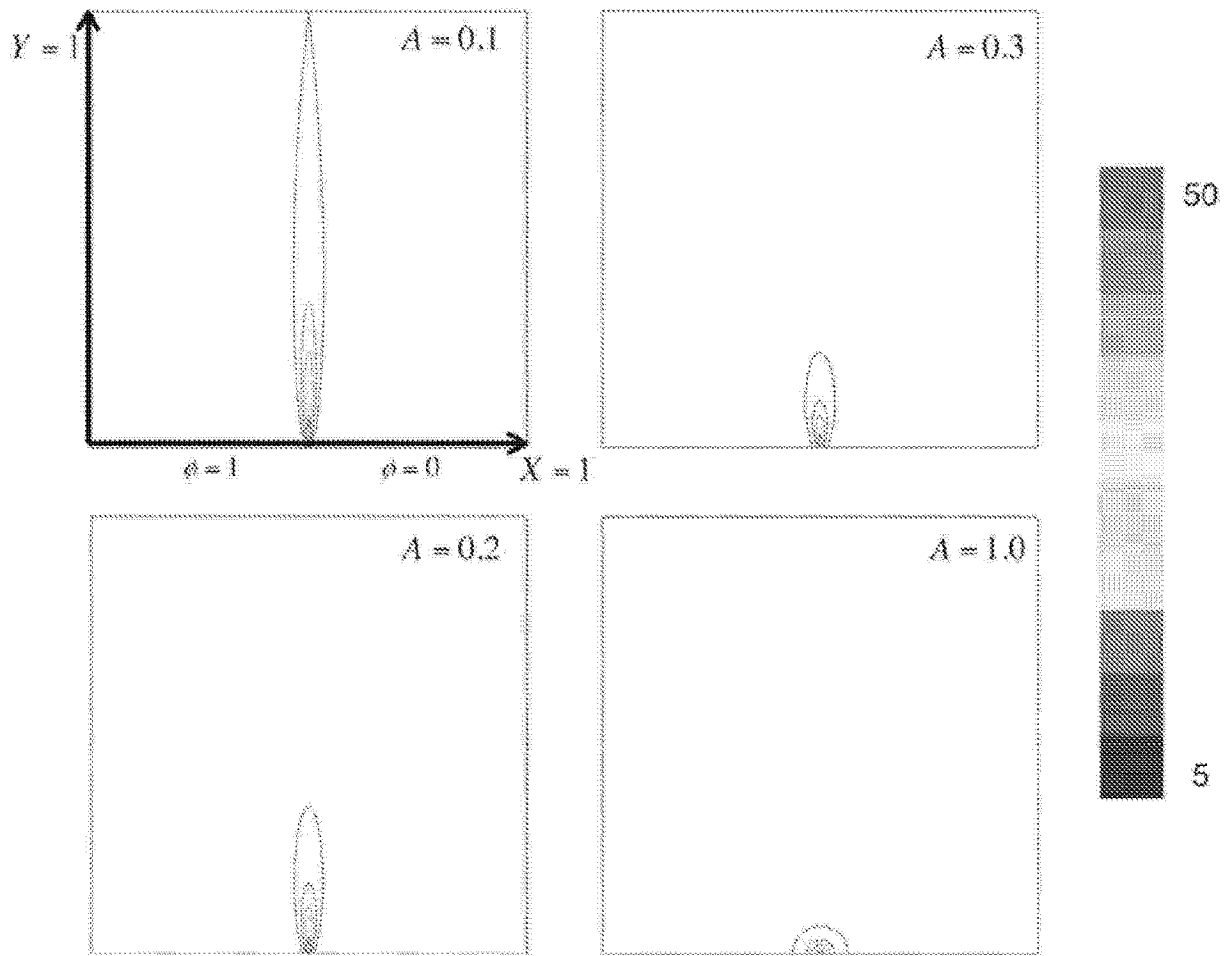


图 7

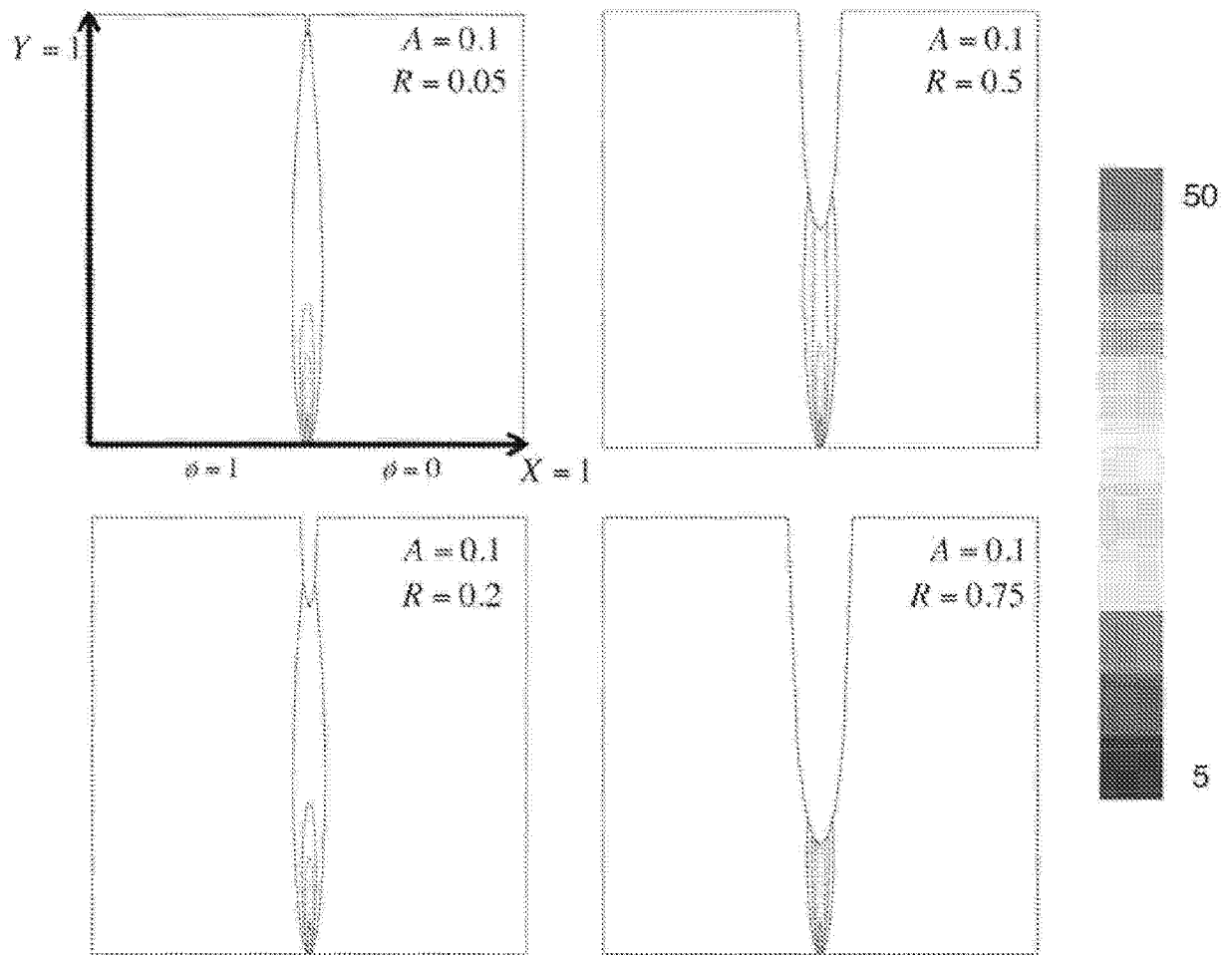


图 8

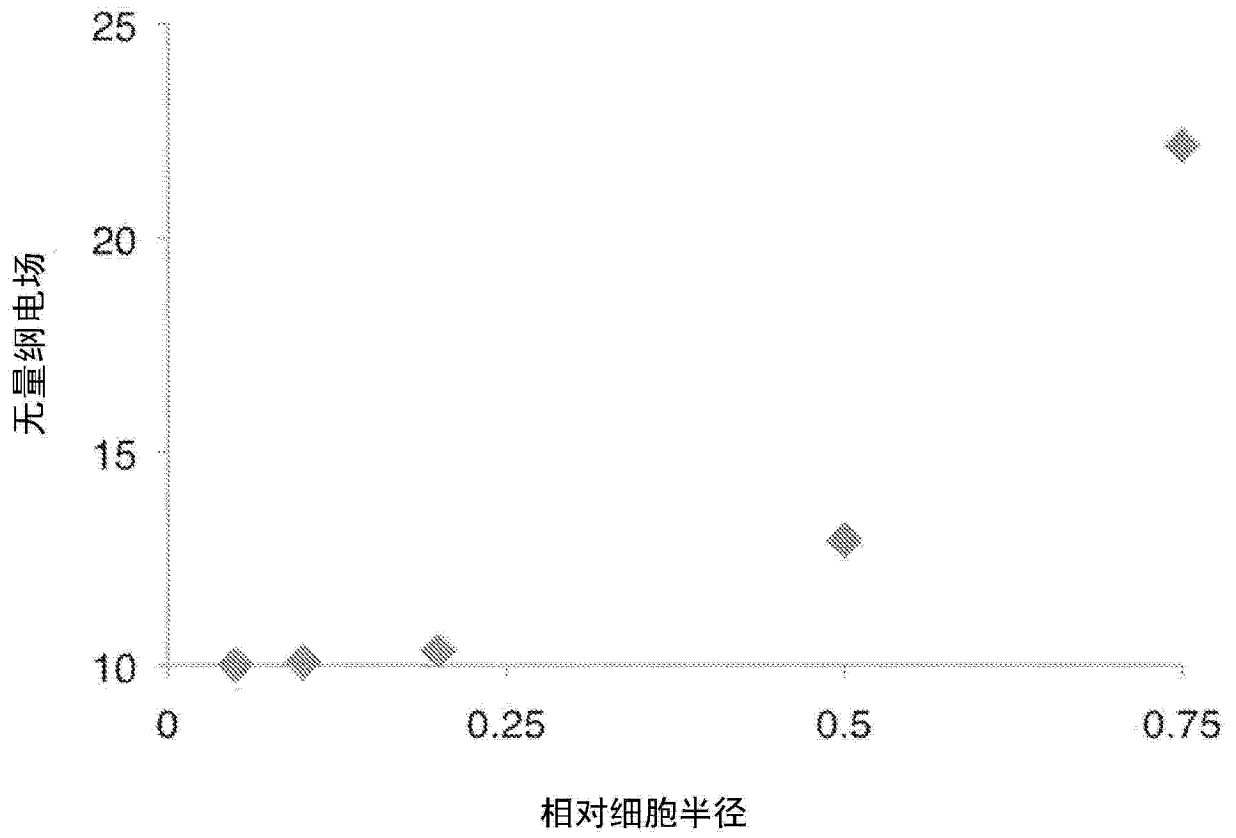


图 9

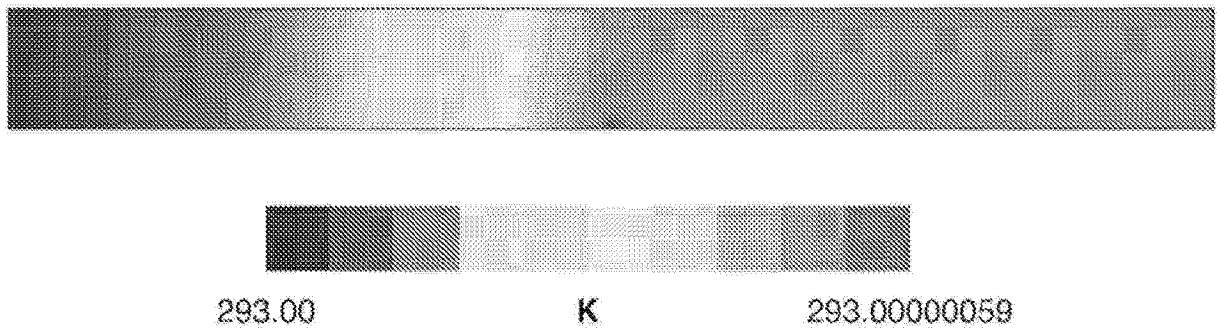


图 10

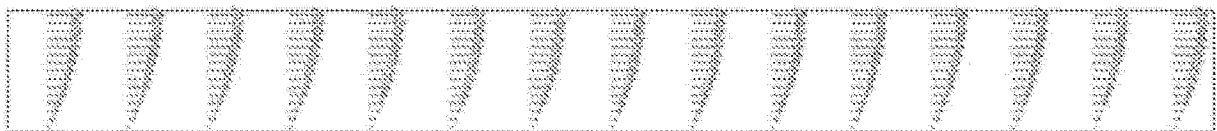


图 11

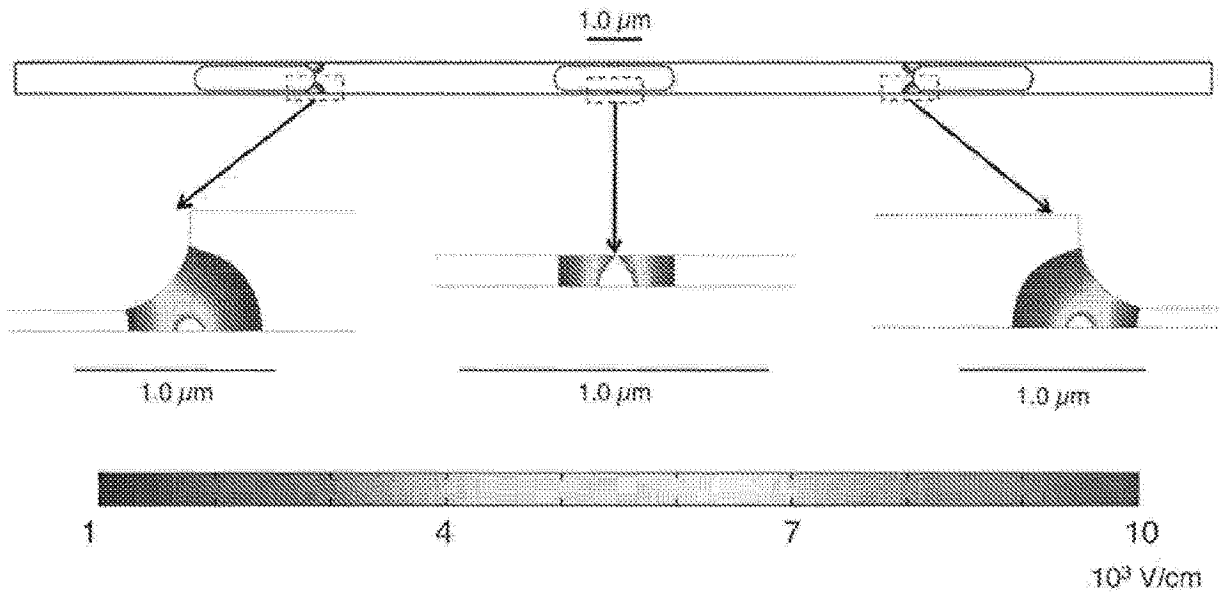


图 12

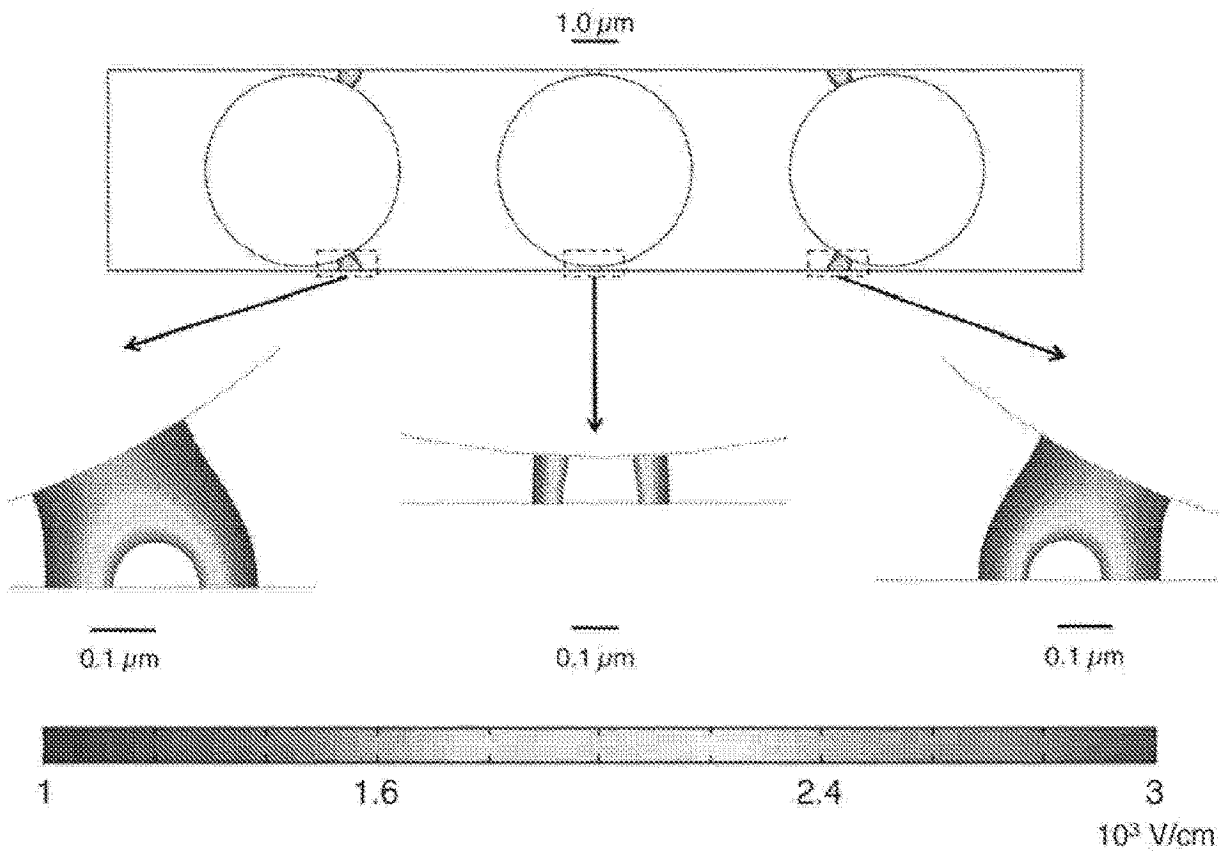


图 13

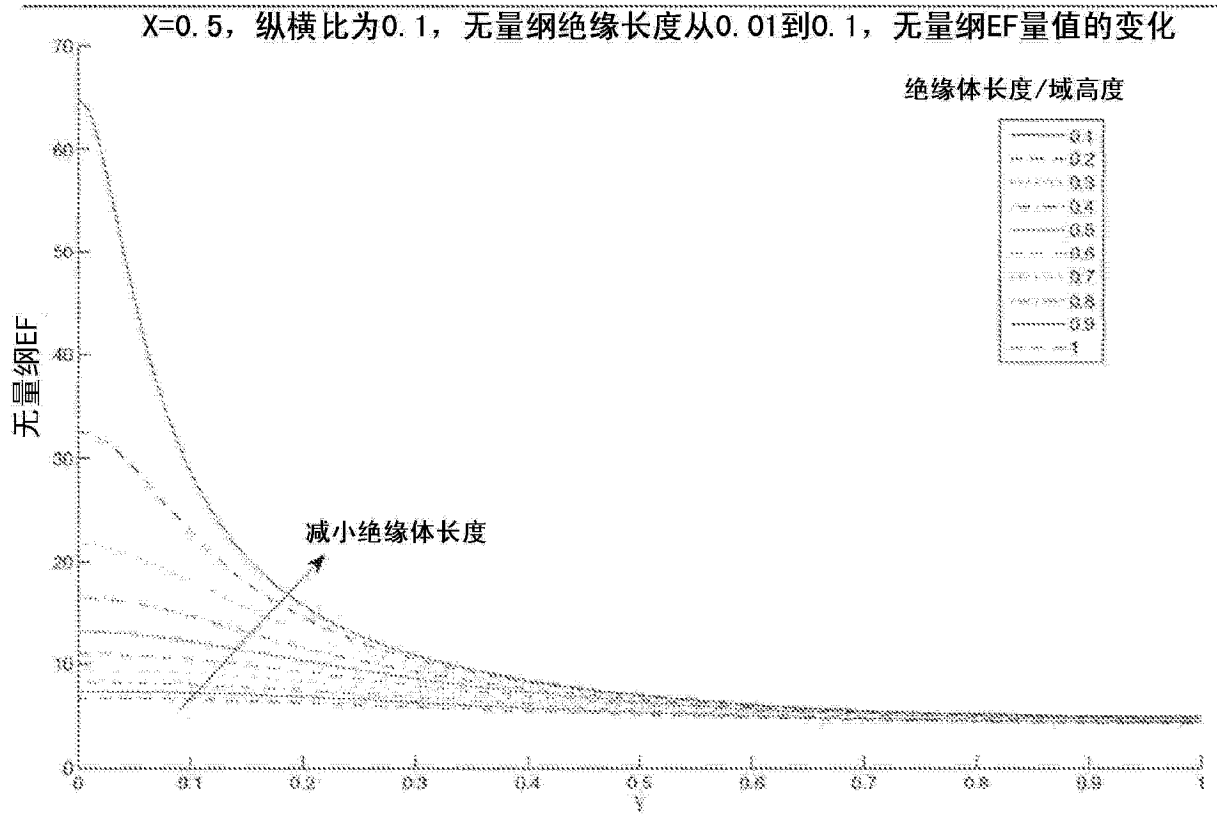


图 14

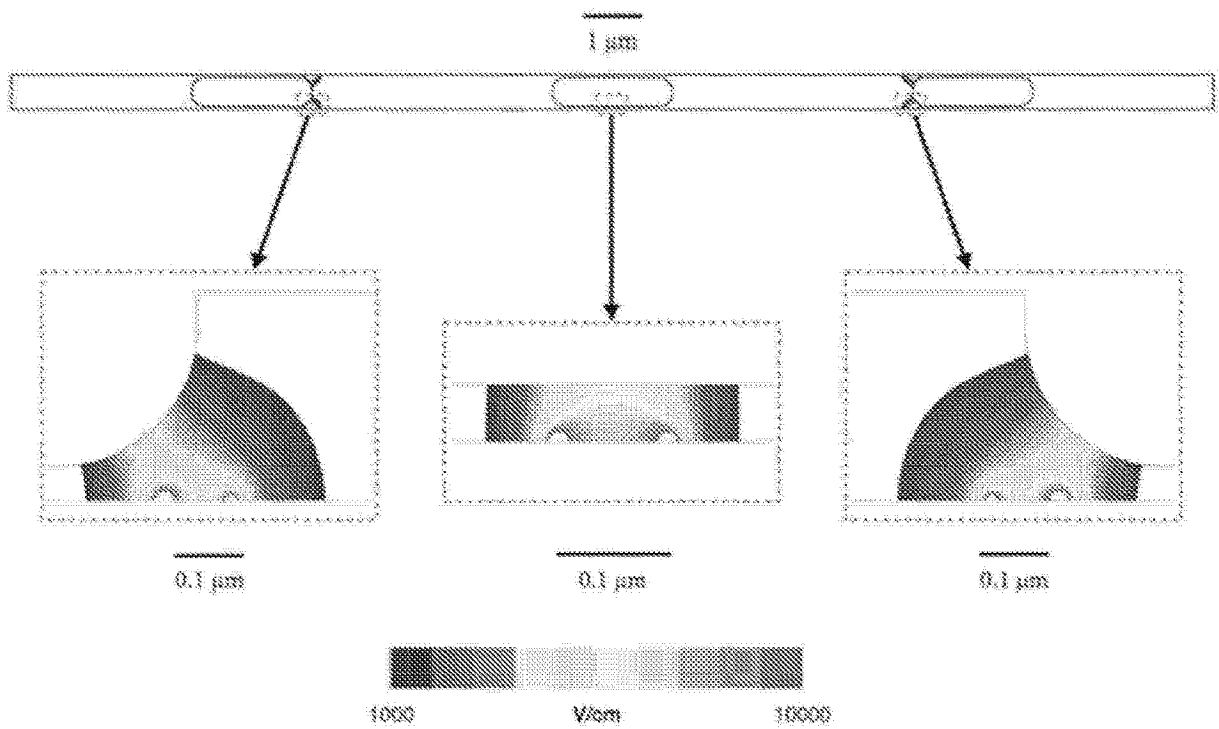


图 15

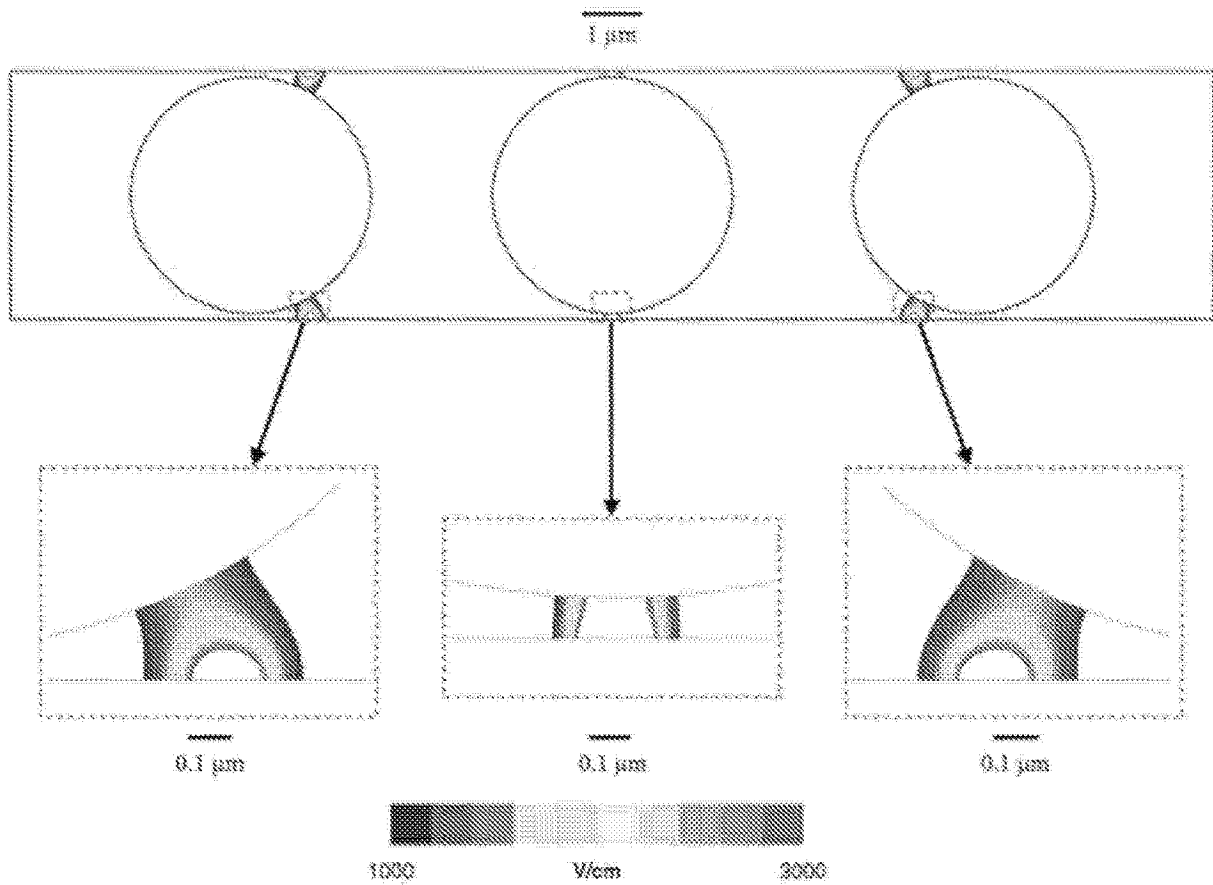


图 16

全局			
法拉第常数	F	$C \cdot mol^{-1}$	96500
通用气体常数	R	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	8.314
温度	T	K	298
电化学电池的平衡电势	E_{eq}	V	1.23
施加的电压	E_{app}	V	1.3-2.5
水电导率	κ	$S \cdot m^{-1}$	0.0025, 0.005, 0.05
阳极			
交换电流密度	$i_{0,a}$	$A \cdot m^{-2}$	10^{-2}
阳极传递系数	$\alpha_{a,p}$		0.5
阴极传递系数	$\alpha_{a,c}$		0.5
阴极			
交换电流密度	$i_{0,c}$	$A \cdot m^{-2}$	10
阳极传递系数	$\alpha_{c,c}$		0.5
阴极传递系数	$\alpha_{c,a}$		0.5

图 17

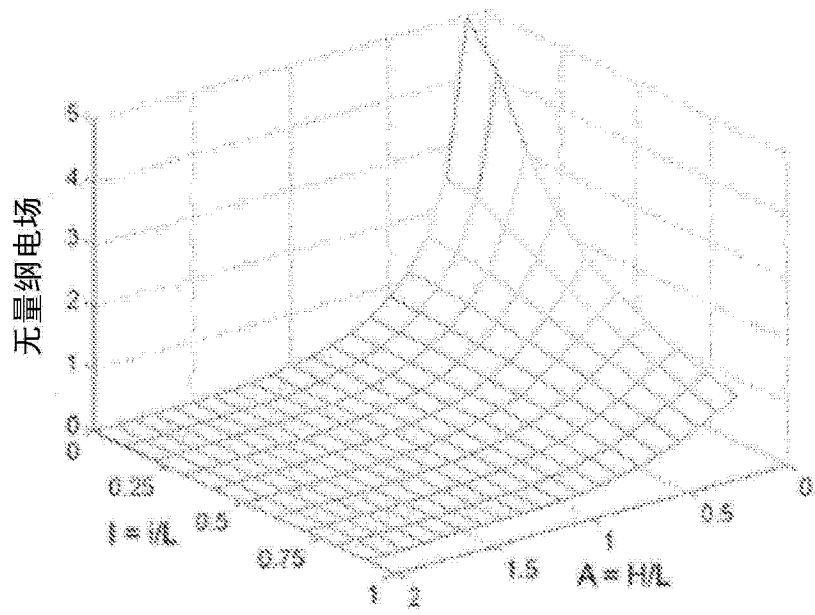


图 18

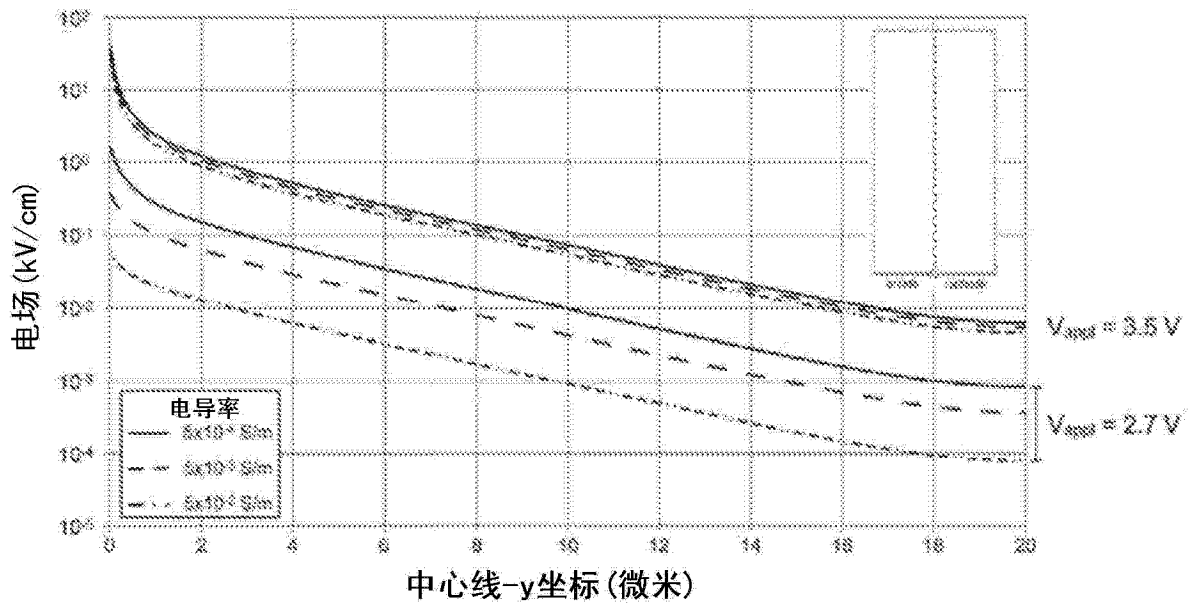


图 19

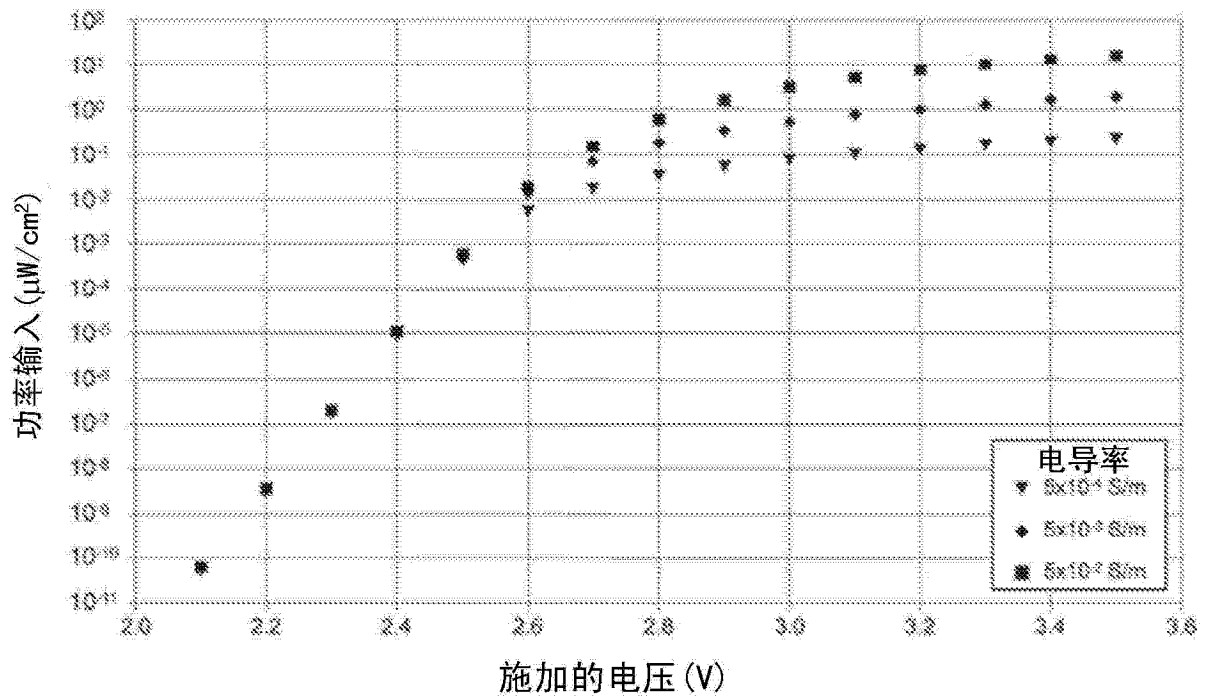


图 20

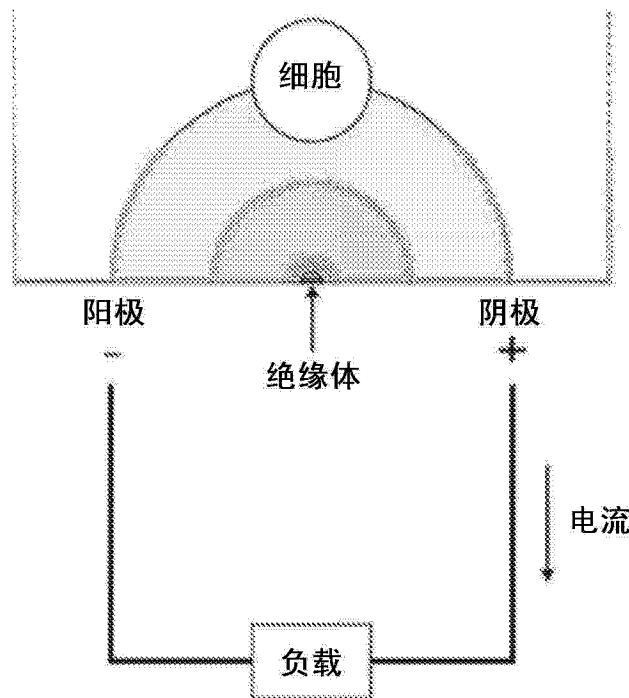


图 21

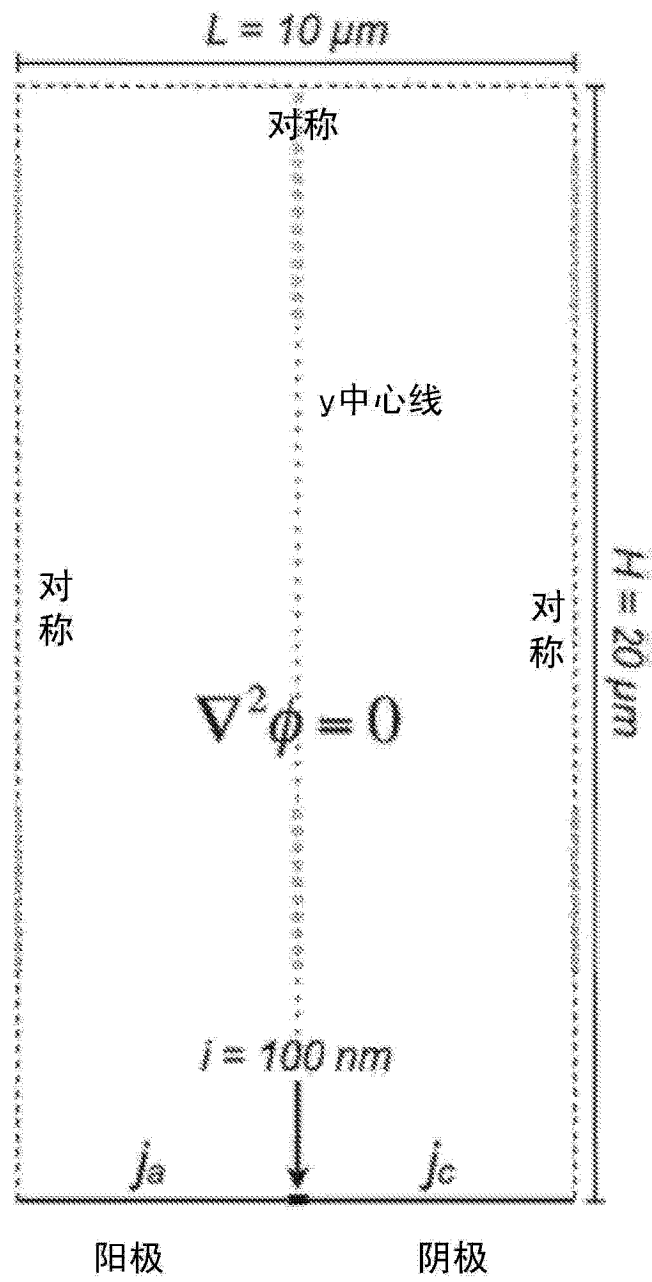


图 22

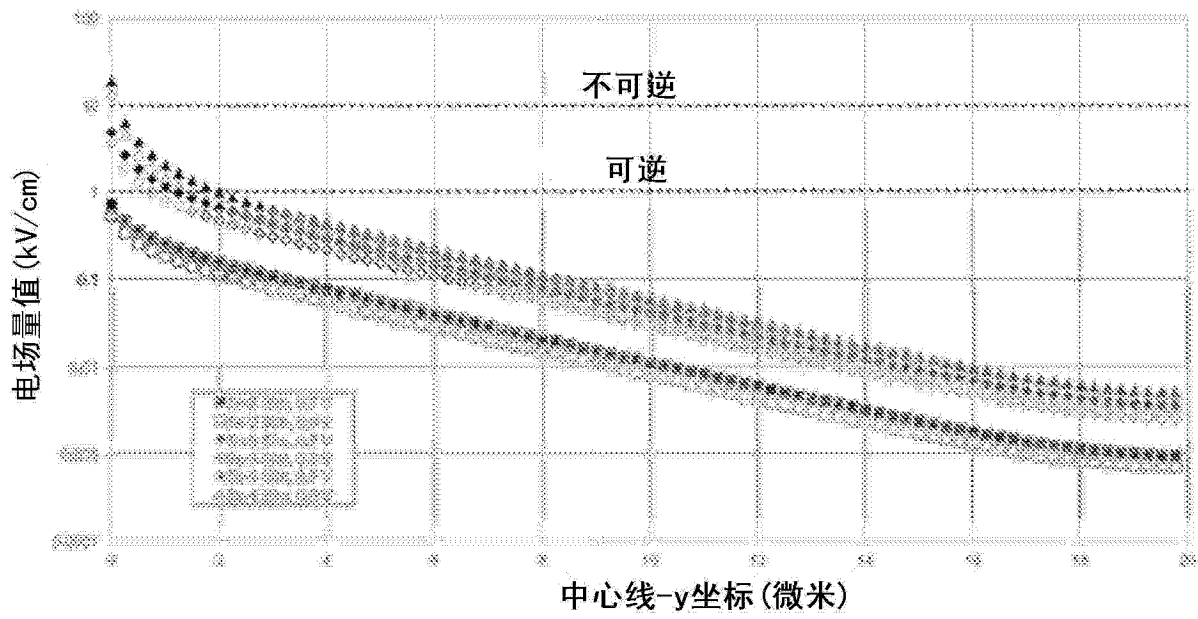


图 23

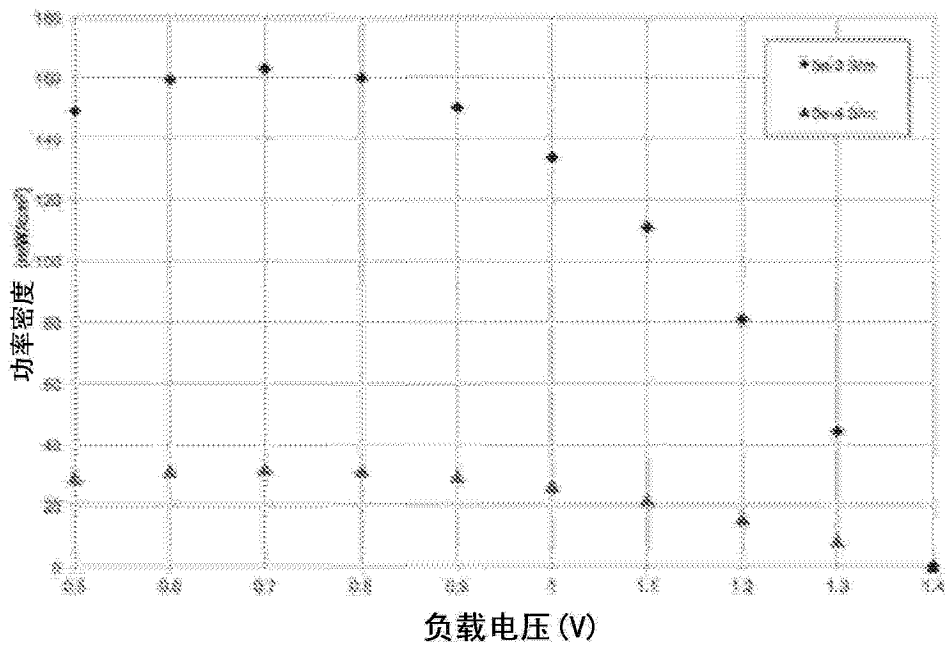


图 24