

1. 一种处理衬底的方法，其包括：

将衬底置于腔室中，所述腔室与位于外部且贴近所述腔室的介电壁的射频线圈耦合，并且所述腔室与在所述射频线圈和介电壁之间设置的电极板耦合，所述电极板接地；

提供射频功率到所述射频线圈，所述射频功率是以介于 10%到 90%之间的占空系数进行脉冲调制的，所述射频线圈在所述腔室中产生射频场，以在腔室中产生含氮等离子体，所述等离子体具有至少为 10^{10}cm^{-3} 的离子密度，其中所述电极板将等离子体电势降低到 10V 以下；

将衬底上的一层暴露于所述等离子体中，以将该等离子体中的氮掺入所述衬底的层。

2. 如权利要求 1 所述的方法，其中所述等离子体具有小于 2eV 的电子温度。

3. 如权利要求 1 所述的方法，其中所述层是二氧化硅层。

4. 如权利要求 1 所述的方法，其中所述介电壁是圆顶状的，所述射频线圈穿过所述介电壁而围绕一轴线呈螺旋形，并且，所述电极板上具有开口。

5. 如权利要求 4 所述的方法，其中所述开口处于所述射频线圈所形成的周边之内。

6. 如权利要求 1 所述的方法，其中所述腔室中的压力至少为 5mT，射频激励至少为 1000W，而且离子密度至少为 $5\times 10^{10}\text{cm}^{-3}$ 。

7. 如权利要求 6 所述的方法，其中所述压力至少为 40mT。

8. 如权利要求 1 所述的方法，其中所述射频功率是以介于 1kHz 到 100kHz 之间的频率进行脉冲调制的。

9. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中施加到所述射频线圈的有效
的射频功率在 100 到 3000W 之间。

10. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中所述射频功率的幅值在高
低状态之间变化。

用于处理衬底的等离子体方法和装置

发明背景

技术领域

本发明主要涉及一种等离子体反应器和一种用此反应器中产生的等离子体来处理衬底的方法。更具体地说，本发明涉及利用一种脉冲等离子体处理装置和一种用以产生等离子体的方法，与传统等离子体处理反应器相比，该等离子体具有较低的温度。

背景技术

集成电路的制造包括在硅衬底或其他半导体衬底内和其上制造场效应管。场效应管的制造包括栅极介电层的形成。通常是借助于将衬底的硅暴露在氧气中来生长介电层，由此而形成二氧化硅栅极介电层。

随着逻辑器件日趋小型化，在二氧化硅栅极介电层中掺入氮已变成是有益的。通常是借助于在腔室中产生氮离子的等离子体、并使氮离子注入栅极介电层中来掺入氮。典型的是，利用具有电极板（电容性耦合）或线圈（电感性耦合）的射频（RF）源来产生等离子体。射频源在腔室中的气体中产生射频场，而上述耦合产生等离子体。

独立于射频源的类型（金属板或者是线圈），从源到等离子体能够有很大的电容性耦合，这会产生相对大的等离子体电势，在几十伏的量级。这么大的等离子体电势可能导致氮离子对二氧化硅层的过度轰击，而这会破坏二氧化硅层，甚至会破坏向下面的硅中掺入氮。不管是对二氧化硅层的破坏，或者是对向下面的硅中掺入氮的破坏，都会减少掺入氮的益处。

发明内容

根据本发明的一个方面，本发明提供了一种处理衬底的方法，此方法包括：在处理腔室中设置衬底；在此腔室中产生氮等离子体，此等离子体所具有的离子密度至少为 10^{10}cm^{-3} ，其电势小于 20V；将上述衬底上的一层暴露于等离子体，以将氮从等离子体引入此层中，对被

设置成从外部贴近所述腔室的介电壁的射频线圈施加射频电流，其中所述射频电流的幅值在高低状态之间变化。

根据本发明的另一方面，本发明提供了一种处理衬底的方法，其中：在等离子体处理腔室中设置衬底；使含氮气体流入此腔室；通过上述腔室中的线圈提供射频电流，从而产生射频场；该射频场由上述气体产生含氮的射频等离子体，而射频电流是脉冲调制的；并将氮离子和激发的中性粒子从等离子体区掺入在上述衬底上所形成的栅极介电层中。

根据本发明的一个进一步的方面，本发明提供了一种等离子体反应器，此反应器包括：一腔室，其具有一开口，用以将衬底传送至该腔室内部；一衬底夹持器，其在腔室中，用以夹持衬底；一射频线圈，其被设置成从外部贴近腔室壁；以及一接地电极板，其位于上述的腔室壁与射频线圈之间。

本发明的实施例进一步提供了一种形成含氮栅极介电层的方法。此方法包括：通过将含氮处理气体引入处理腔室中，并对该处理气体施加电离能量，而在上述处理腔室中产生含氮等离子体；对电离能量作脉冲调制，以保证含氮的等离子体中电子的平均温度不超过 0.7eV。

本发明的实施例进一步提供了一种控制作用在含氮栅极介电层上的含氮等离子体组分的平均能量的方法，此方法包括：将被用来保持含氮等离子体的电离源作脉冲调制，以在足够的第一持续时间内使含氮等离子体激发；并关断电离源且允许含氮等离子体的组分在第二持续时间内耗散，第二持续时间比第一持续时间长，并且第二持续时间是经过计算的，为的是使产生的含氮等离子体组分的能量小于 0.7eV。

附图说明

本发明将参考附图而通过例子来进一步得到描述，其中：

图 1 是本发明的一个实施例中等离子体反应器的透视图；

图 2 是等离子体反应器的上部元件的侧面剖视图；

图 3 是说明在二氧化硅栅极介电层中掺入氮离子的侧面剖视图；

图 4 是一个图表，针对不同的射频源和用朗缪尔探针 (Langmuir Probe) 所测量的电极板结构配置，将等离子体电势作为压力的函数进行说明；

图 5 是一个图表，针对用朗缪尔探针所测量的电极板结构配置，将漂移电压作为压力的函数进行说明；

图 6 是一个图表，针对用朗缪尔探针所测量的电极板结构配置，将电子密度作为压力的函数进行说明；

图 7 是一个图表，针对用朗缪尔探针所测量的电极板结构配置，将离子密度作为压力的函数进行说明；

图 8 是一个图表，针对用朗缪尔探针所测量的电极板结构配置，将电子温度作为压力的函数进行说明；

图 9 是对应本发明的一个实施例的叠层板的仰视图，其中包括电极板；

图 10 是侧面剖视图，说明在一个安装位置的上述叠层片；

图 11 是一个图表，说明了以 30% 的占空系数 (duty cycle) 对射频线圈作射频激励的脉冲调制；

图 12 是一个与图 11 类似的图表，其占空系数为 50%；

图 13 是一个图表，说明了在以受脉冲调制的射频激励进行含氮等离子体处理之前和之后的厚度变化，并提供了掺入氮的测量值；

图 14 是一个图表，说明了对不同的样品用不同的连续射频激励设定值进行处理的厚度变化；

图 15 是一个图表，对于两种脉冲频率，将厚度变化作为射频源的峰值功率的函数进行了说明；

图 16 是一个图表，对于两种脉冲频率，将厚度变化作为射频源的峰值功率的函数进行了说明；

图 17 是一个图表，说明了对于 500W 峰值功率，在不同的脉冲频率和占空系数下的光学发射光谱；

图 18 说明了对于 50% 的占空系数，在不同的脉冲频率和峰值功率下的光学发射光谱；

图 19 中是有效功率与峰值密度的关系曲线图；

图 20 是有效功率与峰值密度的另外一个关系曲线图；

图 21 是电子温度与供给电离源的电力频率关系曲线图；

图 22 是栅极跨导与 NMOS 器件中的含氮量的关系曲线图；

图 23 是栅极跨导与 PMOS 器件中的含氮量的关系曲线图。

具体实施方式

图 1 和图 2 根据本发明的一个实施例说明了等离子体反应器 10，它包括：腔室 12，衬底夹持器 14，射频线圈 16，以及电极板 18。电极板 18 穿过腔室 12 的壳体接地 20。通过将电极板 18 接地，消除了射频线圈 16 和处于腔室 12 的内部空间 24 中的等离子体 22 之间的电容性耦合。消除这种电容性耦合降低了等离子体 22 的电势，而不显著改变等离子体 22 的其它特性，如离子密度和电子密度。得自射频线圈 16 的电感性耦合并未减少，并且这种耦合产生并保持等离子体 22。

特别地参考图 1，等离子体反应器 10 还包括下部传送腔室 26 和传送装置 28。腔室 12 被设置在传送腔室 26 的顶部。传送腔室 26 的内部空间 30 被设置成通过腔室 12 底部的圆形开口 32，而与腔室 12 的内部空间 24 连通。衬底夹持器 14 被固定在传送装置 28 的顶部，并且传送装置 28 可以被用来升高或者降低衬底夹持器 14。

在使用时，操纵传送装置 28 而使得衬底夹持器 14 降低，进入传送腔室 26 的内部空间 30 中。然后，通过传送腔室 26 的壁上的一个缝隙阀开口，将被置于一叶片上（该叶片固定到自动机械臂上）的晶片衬底传送到内部空间 30 中。传送装置 28 随后受到操纵，升高衬底夹持器 14，从而使衬底夹持器 14 接触晶片衬底的下表面，并将晶片衬底抬高而离开上述叶片。该叶片然后便从传送腔室 26 中退出，在此之后，传送装置 28 再次受到操纵，而使衬底夹持器 14 升高进入开口 32。然后，被置于在衬底夹持器 14 上的晶片衬底的上表面就暴露于腔室 12 的内部空间 24 中。

腔室 12 主要包括导电壳体 36 和绝缘的石英顶壁 38。导电壳体 36 构成了腔室 12 的下面部分，而顶壁 38 构成了腔室 12 的上面部分。导电壳体 36 和顶壁 38 连接而形成内部空间 24。

有四个气体喷嘴口 40 穿过导电壳体 36 通入内部空间 24。这些气体喷嘴口 40 被设置在衬底夹持器 14 周围，彼此间隔 90°。而导电壳体 36 也在它这一边形成了真空抽吸通道 42。气体喷嘴口 40 通过阀门与集气管相连接，而真空抽吸通道 42 则与泵相连接。当泵运行时，内部空间 24 中的气体便通过真空抽吸通道 42 被抽出，从而降低内部空间 24 中的压力。可以操纵阀门，而使气体得以通过阀门和气体喷嘴口 40

从集气管流入内部空间 24 中。

特别地参考图 2，顶壁 38 呈圆顶状，并且，电极板 18 呈圆顶状，而与顶壁 38 的外表面一致。电极板 18 实际上被直接设置在顶壁 38 上。电极板 18 在顶壁 38 的中心上方形成了圆形开口 44。顶壁 38 和电极板 18 均关于垂直轴线 46 对称。

线圈 16 围绕着垂直轴线 46 和开口 44 呈螺旋形。线圈 16 被设置在电极板 18 上，并且与电极板 18 的圆顶形状相一致。线圈 16 的一端连接射频源 50，而线圈 16 的另一端则接地 52。

现在同时参考图 2 和图 3。在晶片衬底被放入等离子反应器 10 而置于衬底夹持器 14 的上表面上之前，先在晶片衬底的上表面上形成一外延硅层 54。同样在晶片衬底被放入等离子反应器 10 而置于衬底夹持器 14 的上表面上之前，在硅层 54 的上面生长一层薄的二氧化硅层 58。二氧化硅层 58 大约有若干埃（例如 40Å）厚，并在最终制造成的晶体管中用作栅极介电层。将晶片衬底放入等离子反应器 10 内的目的是在二氧化硅层 58 中掺入氮（N），以改变或者改善其介电特性。氮离子（ N_2^+ ）等离子体 22 是在内部空间 24 中产生的。氮离子所具有的能量由将其掺入二氧化硅层 58 的等离子体的特性决定。

产生等离子体，首先是将内部空间 24 中的气压降低到一预先设定的水平；然后再将含氮气体引入内部空间 24 中，该含氮气体举例来说可以是：纯氮气（ N_2 ），氮气和氦气的混合气体（ N_2/He ），氮气和氖气的混合气体（ N_2/Ne ），或者是氮气和氩气的混合气体（ N_2/Ar ）；对于进一步的讨论来说，所给出的例子中使用的是纯氮气。

然后，操纵射频源 50 以给线圈 16 提供频率为 13.56MHz 的射频电流。射频线圈 16 产生射频场，此射频场借助电极板 18 扩散而穿过顶壁 38。圆形开口 44 使射频场得以穿过顶壁 38 进入内部空间 24。射频场随后与内部空间 24 中的氮气耦合。最初射频场激发少量自由电子。然后这些自由电子与其它原子碰撞，而由这些原子中释放出更多的电子。此过程持续进行，直至达到稳定状态，此时，等离子体 22 中有固定数量的自由电子和自由离子、稳定的电子温度、和不变的对地电压。这样，就在内部空间 24 中产生了一个离子的“容器”，并且等离子体 22 的电压电势帮助离子从此容器掺入到二氧化硅层 58 中。衬底和衬底

夹持器 14 的电势在整个处理过程中自由漂移，但是，在等离子体 22 的电压和衬底夹持器 14 的电压之间有一定差值，这一差值驱动离子掺入。此差值与瞬时电子温度成正比，并且，氮的掺入由对时间平均的电子温度所驱动。此处所称的“电子温度”应被理解为意思是指许多（例如数千）脉冲周期内对时间平均的电子温度。

如果电极板 18 不接地，射频线圈 16 便将与等离子体 22 电容性耦合。这种射频线圈 16 和等离子体 22 之间的电容性耦合提高了等离子体 22 的电压。相反地，通过将电极板 18 接地，就可以显著减少这种电容性耦合，并且降低等离子体 22 的电压。等离子体电势和电子温度降低了，但是离子密度仍保持相对的高。为了防止过多的氮通过 SiO_2 掺入硅衬底，等离子体电势优选小于 10V。电子温度优选接近于或者是小于 2eV。离子密度则优选至少为 10^{10}cm^{-3} 。

图 4 显示了分别在不使用电极板、使用不接地的规则电极板和接地电极板的情况下的试验结果。对每一种情况，试验结果均在射频线圈 16 施加 300W、500W、和 900W 的激励下获得。图中较大的方块或者三角形标志较大的激励幅值。在对射频线圈 16 提供的一定激励处，等离子体电压 (V_p) 对于接地电极板来说最低，对于不接地电极板来说则较高，而当没有电极板时甚至就更高。在其他的例子中，施加到射频线圈 16 上的有效射频激励可能在 160W 和 3000W 之间。如果不用接地电极板，就不能达到低于 10V 的电势。值得注意的是，电势并不随着施加到射频线圈上的激励的增加而显著增加。即使是超过 1000W（例如 1400W）的大幅值激励，在压力大于 5 微托 (mT) 时，产生的等离子体电压低于 20V；而在压力大于 40mT 时，产生的等离子体电压低于 10V。

图 5 说明了对应于图 4 情况的等离子体的漂移电压。晶片衬底处的电势是 V_f 或者接近于 V_f 。再次可见，衬底电压 (V_s) 对于接地电极板最低，对于不接地电极板较高，而在不使用电极板时甚至更高。

图 6 和图 7 分别说明电子密度和离子密度。对于施加给射频线圈 16 的给定幅值的激励，电子密度（或离子密度）在使用接地电极板和使用不接地电极板时相差无几。虽然图中未示，当给射频线圈施加的射频激励超过 1000W 时，可以得到大于 $50 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$ 的离子密度。

图 8 图示了电子温度。可以看出：在较低压力下，电子温度在使用接地电极板、使用不接地电极板和不使用电极板三种情况下的差别相对较少。然而，在较高压力下，典型的是高于 40mT 时，在使用不接地电极板的情况下，或者在不使用电极板的情况下，电子温度要比使用接地电极板的情况下高得多。

参考图 9 和图 10，电极板 18 被叠置于两个介电片 60 和 62 之间。电极板 18 以及介电片 60 和 62 均被构造成处于带条 64 中，而当彼此相向折叠时，就共同形成圆顶形状。介电片 60 被设置在顶部，处于电极板 18 和射频线圈 16 之间。电极片 62 被设置于电极板 18 和顶壁 38 之间。电极板的末端并不被介电片 62 遮盖，而是留出暴露的连接盘 (land) 66。暴露的连接盘 66 与导电导体 36 的导电部分相接触，以便将电极板 18 接地于导体 36 上。连接盘 66 被设置于电极板 18 的周边，从而使得电极板 18 的周边接地。电极板 18 的周边接地保证了整个电极板 18 尽可能接近于 0 伏电压。

也可以通过对施加到射频线圈 16 上的射频激励作脉冲调制的方式来降低等离子体电压。虽然应该理解，在对施加到射频线圈 16 上的射频激励作脉冲调制的同时，将电极板 18 接地也是可以的，但是，在现在提供的例子中，电极板 18 没有接地。

如图 11 和图 12 所示，射频激励具有 13.56MHz 的频率，而且对射频线圈 16 施加了预设的峰值功率。射频激励可用自动方式来接通和断开，即“脉冲调制的”。在所提供的例子中，射频激励是频率为 10kHz 的自动脉冲。在其他例子中，射频激励可以是频率在 1kHz 到 100kHz 之间的脉冲。氮等离子体的成分通过射频电流在高低状态之间的变化而被连续地变化。在图 11 中，占空系数（亦即射频激励接通的总时间）是 30%，而在图 12 中，占空系数是 50%。射频源 50 是可以脉冲调制的，并且脉冲频率和占空系数均可以手动调节。有效输出功率是峰值功率乘以占空系数。在其他的例子中，占空系数可以在 10%到 90%之间。在所给的例子中，射频激励的幅值在 0%到 100%之间连续变化，但在另一个例子中，幅值举例来说可能在 10%到 100%之间变化。

一种测量氮掺入量的方法是测量在氮等离子体处理之前和之后的厚度变化（“光学增量”）。较大的厚度变化表明较多的氮掺入量。如图

13 所示，使用连续激励的氮掺入量也可以使用脉冲激励来实现，此时氮的掺入量近似与有效输出功率成比例。光学厚度上的变化对脉冲频率相对地不敏感。

图 14 图示了用连续射频源激励制备的样品的光学增量；对于脉冲激励和连续激励，均对以激励掺入的氮的饱和度进行了观测。

图 15 和图 16 显示与图 13 中相同的数据，绘出了源功率对占空系数的曲线，显示了与图 13 相同的趋势。

在图 17 和图 18 中，使用光学发射分光计捕获了其光学发射光谱。从图 17 中可以看出，在固定的峰值射频功率（500W）下，随占空系数增加，光谱即接近 500W 的连续激励光谱（顶线）。脉冲频率对所观测的密度具有很小影响。图 18 表明通过增加峰值射频功率，可以使脉冲调制使射频的发射水平复原到连续激励的发射水平（顶线）。再次说明发射对脉冲频率相对不敏感。

图 13 到图 16 说明，用脉冲射频等离子体，能够实现与连续射频激励类似的在晶片上的氮掺杂。图 17 和图 18 表明，用脉冲射频激励，能够实现与连续射频激励类似的离子密度。这些数据与脉冲射频激励相对于连续激励降低了电子温度和等离子体电势的效果相结合，表明射频激励的脉冲调制提供了一种在较低能级下向栅极介电氧化物中掺入氮的方法。向衬底中掺入相同量的氮时，与连续激励等离子体中的离子相比，脉冲调制等离子体中受到加速而进入衬底的氮离子较少，这是因为脉冲调制等离子体的等离子体电势比较低。由于这种加速的降低，氮便不能渗入氧化物内部而进入下面的硅层。

正如可轻易预料的那样，在不同的电离能量（10eV 到 30eV）下，对离子穿过薄氧化物层而注入硅、特别是注入 Si（100）的模拟表明，能量越低则掺入越少。在这样一种低能量模式下，用脉冲调制的氮等离子体进行氮掺杂可以提供改善的介电性能，从而直接导致晶体管性能上的改善。

在本发明的另一实施例中，可以通过与处理腔室连通的电离源在处理腔室中产生含氮等离子体。含氮等离子体可以用在晶体管栅极的氮化处理中，亦即含氮等离子体可以用来对晶体管栅极介电层作氮化处理。电离源举例来说可以包括：电感线圈型天线结构，如上面主要

讨论的；狭缝线微波型（slotted line microwave-type）电离源，这是一种普遍公知的径向线天线源（radial line antenna source）；电子回旋加速器谐振源（Electronic Cyclotron Resonance, ECR 源）；磁电管型源或者改进磁电管型源；或者是一般被用来使处理腔室中等离子体的产生更容易的其他电离源。另外，在本发明现有的实施例中，可以通过等离子体脉冲的顺序来控制含氮等离子体，从而产生比传统等离子体处理腔室所能提供的更低的电子温度。特别的是，本发明现有的实施例所提供的脉冲等离子体控制可被用来特定地控制等离子体组分的平均能量（这里主要指电子温度）。对于等离子体的控制被设定成使其产生较低的电子温度，这种较低的电子温度可以例如用于在栅极的氮化处理中改善器件的特性，即在跨导方面产生较少的退化并在栅极介电型器件中改善沟道迁移率。

本发明的等离子体脉冲顺序大致工作是在一短时间段内激发含氮等离子体，然后让此等离子体弛豫或者耗散一段时间。耗散时间让电子温度得以降低，与此同时保持含氮等离子体。因此，本发明的实施例将起到的主要作用是调制电离源的脉冲，使其能量足以保持等离子体经过即将来临的断开或者弛豫时间，亦即计算脉冲启动时间，从而提供足够的能量，以保持等离子体经过即将来临的开断或者弛豫时间（此时没有能量供应给等离子体）。在电离源脉冲截止或者弛豫的部分，等离子体内的电子可以自由扩散。然而公知的是，电子扩散的快慢直接与电子的能量有关。因此，电子的能量越高，即电子越热，其扩散出等离子体就越比具有较低能量的电子迅速，这种情况导致了等离子体组分较低的平均能量，亦即较低的电子温度和较低的等离子体温度。

因此，电离源所提供的脉冲的占空系数也对等离子体组分的平均温度有影响。具体而言，占空系数越大，其对应的脉冲启动时间约长，等离子体就会越热，这是因为等离子体中的电子在脉冲启动时间内受到了较长时间的激发。因此，本发明的实施例主要考虑的占空系数可以在 5%到 90%之间。更具体的说，例如为了产生所需要的等离子体组分的平均温度，占空系数可以是介于 10%到 80%之间、介于 25%到大约 60%之间、及介于大约 30%到 50%之间。进一步的说，本发明的实

施例考虑到被电离的等离子体源可采取伪脉冲 (pseudo-pulse) 方式来使用, 以便控制电子温度。例如作为对脉冲调制的一种替换方案, 可以使电离源的输出在大约 5% 到大约 100% 之间变化, 以控制等离子体的温度。本发明的实施例主要考虑优化脉冲的启动和截止时间, 从而控制电子温度。

作为本发明的实施例的一个例子, 图 21 图示了电子温度与等离子体处理腔室的脉冲射频频率的关系曲线, 其中该等离子体处理腔室使用一电离源来产生等离子体。其数据是使用电感线圈结构的电离源 (如上所述)、且使用匹配的离子密度、激励施加、腔室压力和处理气体流量而得到的。第一个数据点 1901 一般代表在等离子体的初始状态未加脉冲时的电子温度。在第一个数据点 1901, 提供给电离源的功率是恒定的而不是变化的或者脉冲调制的, 因此, 等离子体一旦稳定, 实测的电子温度就保持在 2eV。第二个数据点 1902 表示当电离源的功率以频率 500kHz 作脉冲调制时等离子体中的电子温度。在这个频率下, 测量到的电子温度近似为 0.6eV。第三个数据点 1903 表示当电离源的功率以频率 5kHz 作脉冲调制时等离子体中的电子温度。在这个频率下, 测量到的电子温度近似为 0.55eV。第四个数据点 1904 表示当电离源的功率以频率 10kHz 作脉冲调制时等离子体中的电子温度。在这个频率下, 测量到的电子温度近似为 0.55eV。第五个数据点 1905 表示当电离源的功率以频率 30kHz 作脉冲调制时等离子体中的电子温度。在这个频率下, 测量到的电子温度近似为 0.55eV。第六个数据点 1906 表示当电离源的功率以频率 50kHz 作脉冲调制时等离子体中的电子温度。在这个频率下, 测量到的电子温度近似为 1.25eV。

因此, 图 21 主要图示了脉冲调制的等离子体的具体应用, 该脉冲调制等离子体的作用在于控制等离子体中的电子温度。进一步的, 图 21 主要图示了在仍然保持电子温度小于 0.6eV 的前提下, 施加到电离源的激励的频率可以在大约 500Hz 和大约 50kHz 之间变化 (在大约 100kHz 发生“广播问题”)。更进一步的, 当频率增加到大约 50kHz 时, 电子温度仍然小于大约 1.25eV。正因如此, 本发明现有的实施例, 主要使用电离源对等离子体作脉冲调制, 以便控制等离子体的电子温度, 而更具体的说, 是等离子体中的电子温度保持在 0.7eV 以下。特别

是，本发明现有的实施例提供的电离源被设置成在保证电子温度小于0.6eV的同时，在介于大约1kHz到大约30kHz的频率区间内对处理腔室中的等离子体作脉冲调制。然而，值得注意的是虽然图21中的数据点是在特定的参数（即射频激励、压力、气体流量等等）下获得的，但是，使用连续波等离子体时的电子温度与使用脉冲等离子体时的电子温度，二者之间的关系是：脉冲等离子体的电子温度总是小于使用连续波等离子体时的电子温度，而这与辅助参数无关。

图22图示了最大沟道跨导（ g_{mmax} ）作为层中的含氮百分比的函数的变化关系。值得注意的是，在晶体管的制造中，希望有尽可能最小的变化或者偏移跨导；然而，正如人所共知，在晶体管制造过程中掺入氮主要是要降低晶体管的栅极泄漏，阻止硼从多晶硅栅电极中扩散，并且降低电学厚度，这样会改善断开状态的控制。因此，虽然最大沟道跨导位移的降低可以通过减少氮来实现，但是，减少氮会显著地对上述的栅极泄漏、扩散、和断开状态的控制有不利影响。而如上所述，本发明的作用是在保留氮和氮含量所带来的益处的同时，降低了最大沟道跨导转移。

特别的是，图22图示了：通过连续波配置而产生的含氮等离子体和通过被配置成脉冲调制的电离源而产生的含氮等离子体，在最大沟道跨导方面的差别。对于连续波配置和被配置成脉冲调制的电离源来说，如图形图表符号所示，每个数据点都是使用匹配的压力、激励、持续时间、占空系数（50%）来采集的。例如：数据点2001表示对应于连续波配置，最大沟道跨导偏移和氮的百分比之间的关系。数据点2001表示的最大沟道跨导偏移在大约18.5到大约19.5之间，氮含量大约为12.8%。数据点2002主要表示的是电离源被用来以大约5kHz的频率对含氮等离子体作脉冲调制，主要表明：最大沟道跨导偏移值在大约17.5到大约18.25之间，而含氮量大约为13.2%。数据点2003主要表示的是电离源被用来以大约10kHz的频率对含氮等离子体作脉冲调制，主要表明：最大沟道跨导偏移值在大约18.0到大约18.25之间，含氮量大约为13.9%。数据点2004主要表示的是电离源被用来以大约20kHz的频率对含氮等离子体作脉冲调制，主要表明：最大沟道跨导偏移值在大约17.25到大约17.75之间，含氮量大约为13.8%。数据点

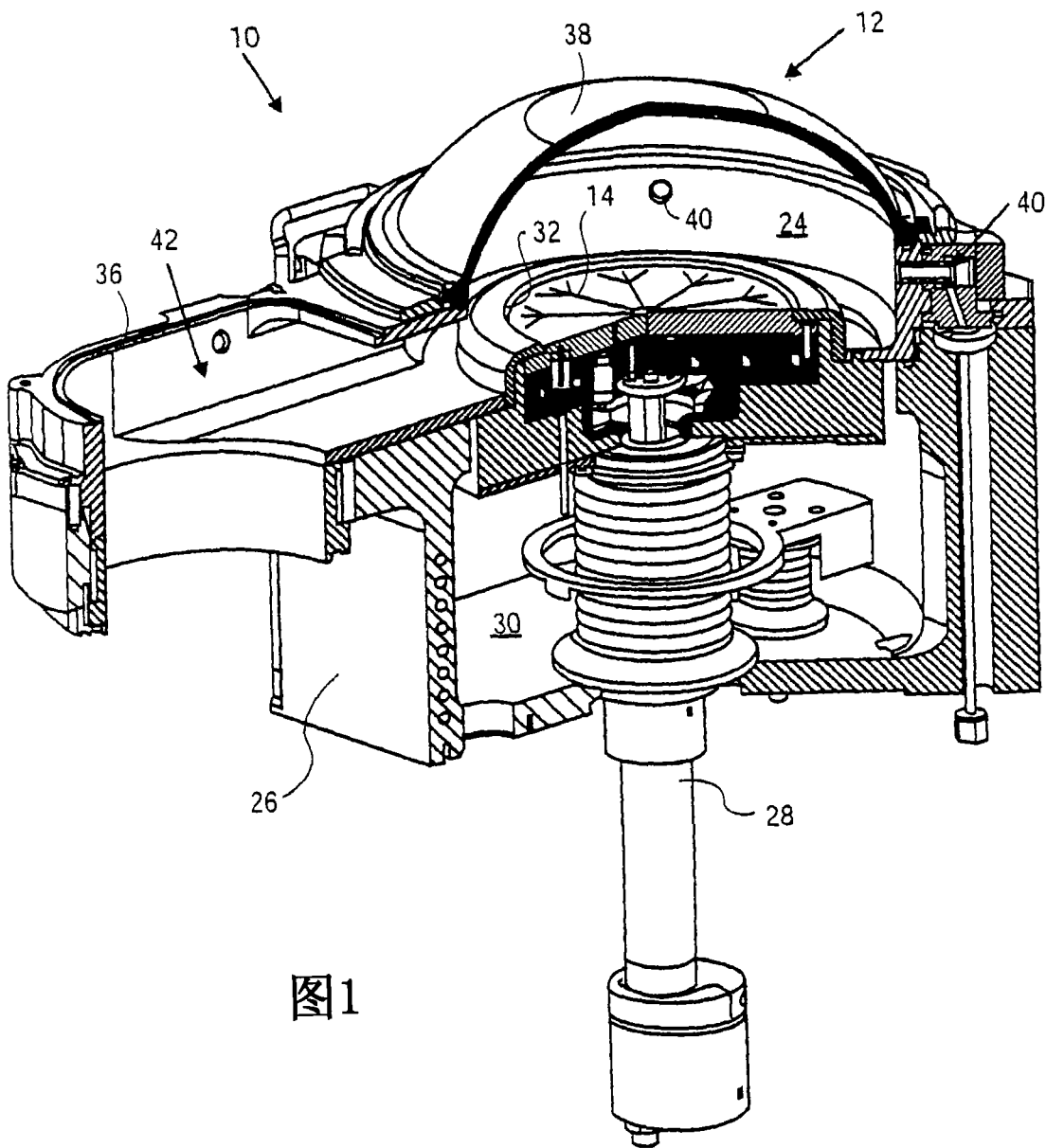
2005 主要表示的是电离源被用来以大约 100kHz 的频率对含氮等离子体作脉冲调制，主要表明：最大沟道跨导偏移值在大约 16.25 到大约 17.0 之间，含氮量大约为 13.3%。大体而言，使用被配置成用以脉冲调制含氮等离子体的电离源的数据点，即数据点 2002、2003、2004 和 2005，提供了改善的最大沟道跨导特性，优于使用连续波配置而产生的含氮等离子体。

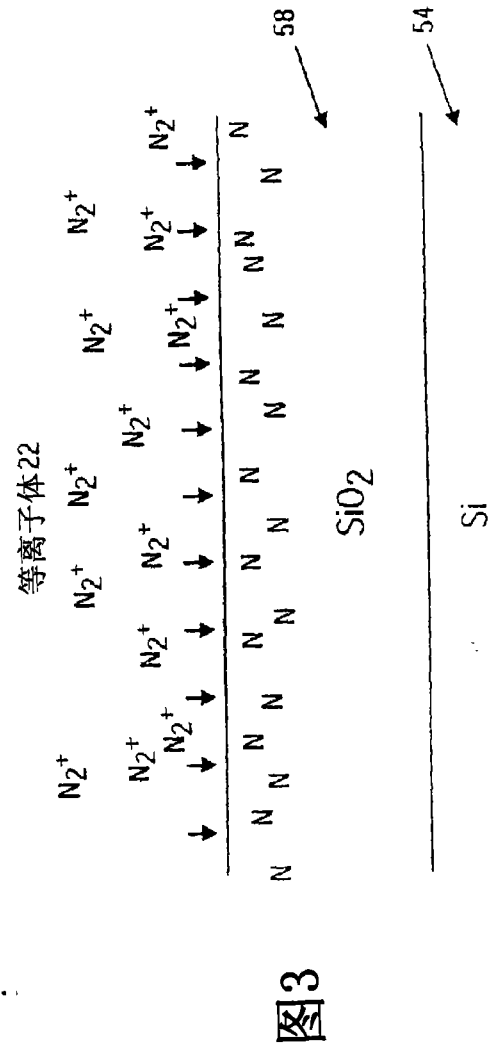
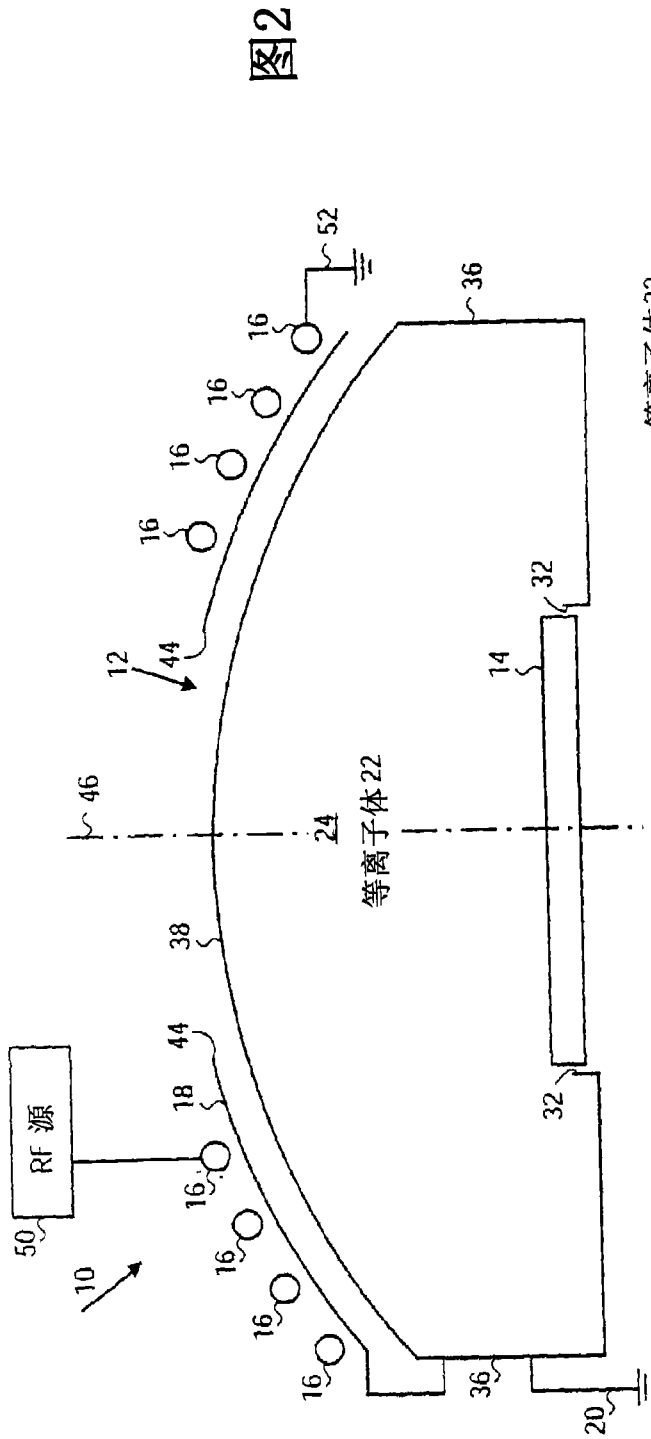
对于阈值电压漂移和饱和漏电流，也获得了类似的改善——类似于图 22 中表示的 g_{mmax} 的变化上的改善。图 22 示出对应于 NMOS 晶体管的结果。如图 23 所示，对于 PMOS 晶体管也可获得类似的改善。

值得注意的是，虽然以上所描述的是在薄的栅极二氧化硅中的硅掺杂，但是所描述的过程可以应用于其它栅极介电材料的硅掺杂，特别是诸如 HfO_2 、 Hf_{1-x} 、或者 Si_xO_2 这样的高 k 介电材料。

进一步的说，虽然所描述的电离能量的脉冲调制是针对电感性线圈电离源而言的，其他实施例可以，举例来说，使用径向线开槽天线电离源（radial line slotted antenna source）、磁电管型源、或者是电子回旋加速器谐振电离源。

虽然以上描述了并在相应附图中展示了一些示例性实施例，但是应该明白，这些实施例只是对本发明的说明而非限制，并且，本发明并不局限于所展示和描述的具体结构和布局，因为本领域普通技术人员可能会对其进行改进。





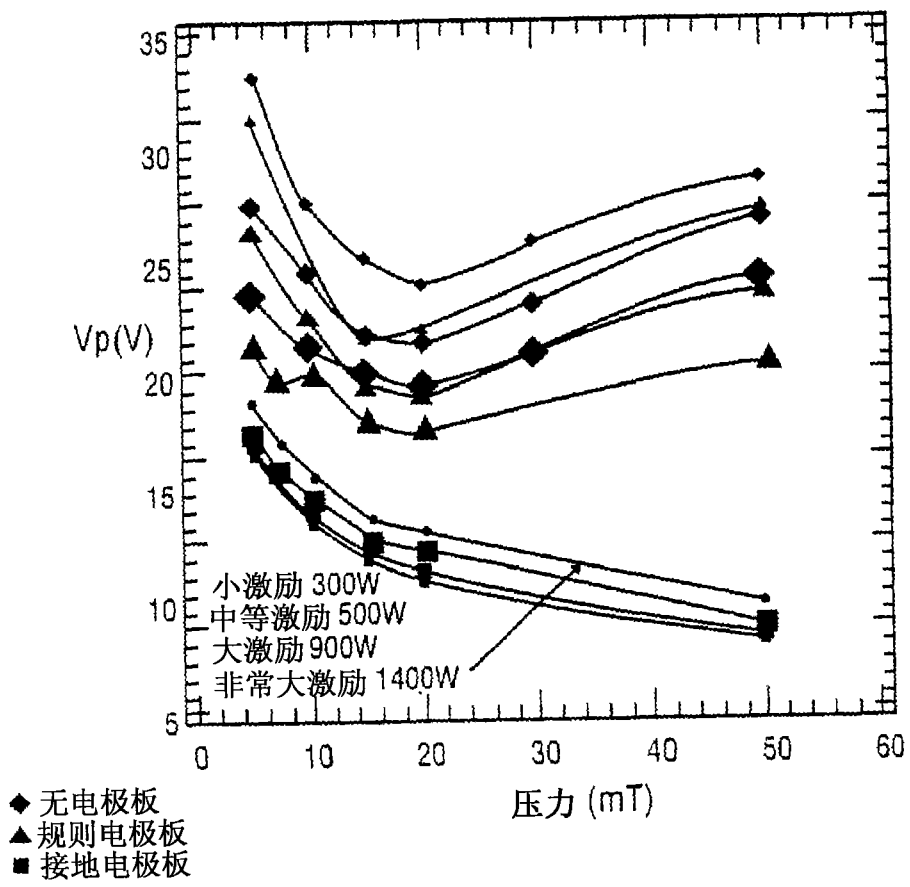


图4

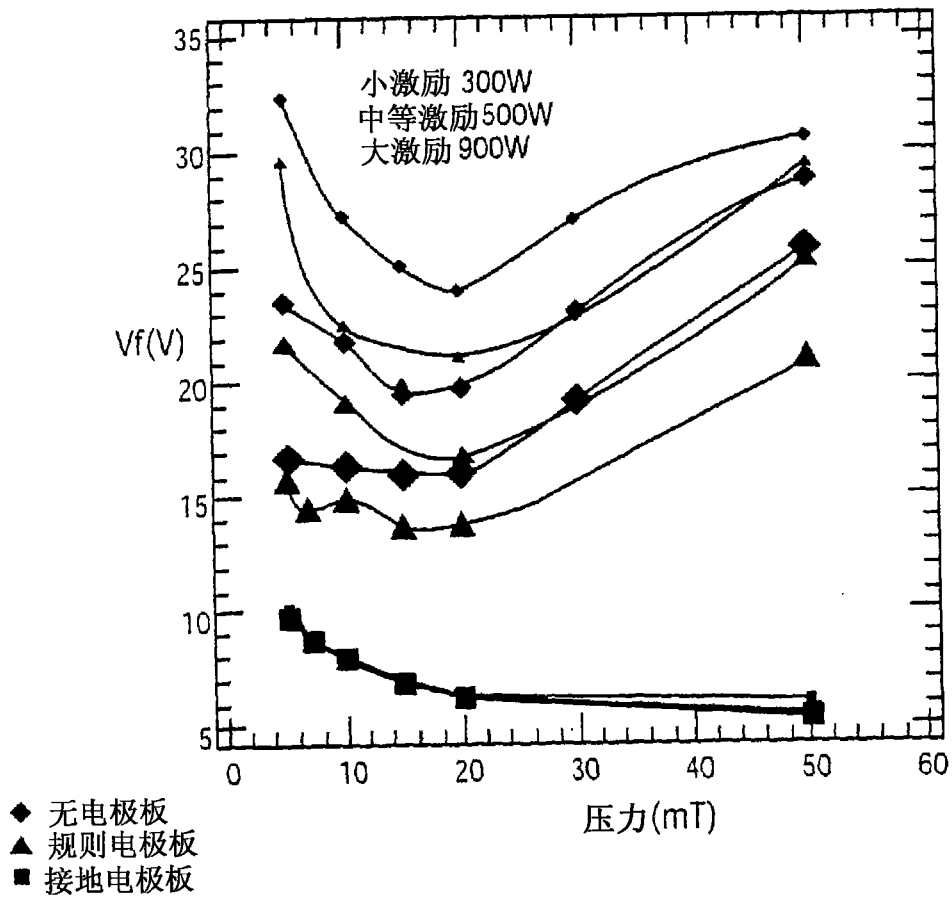


图5

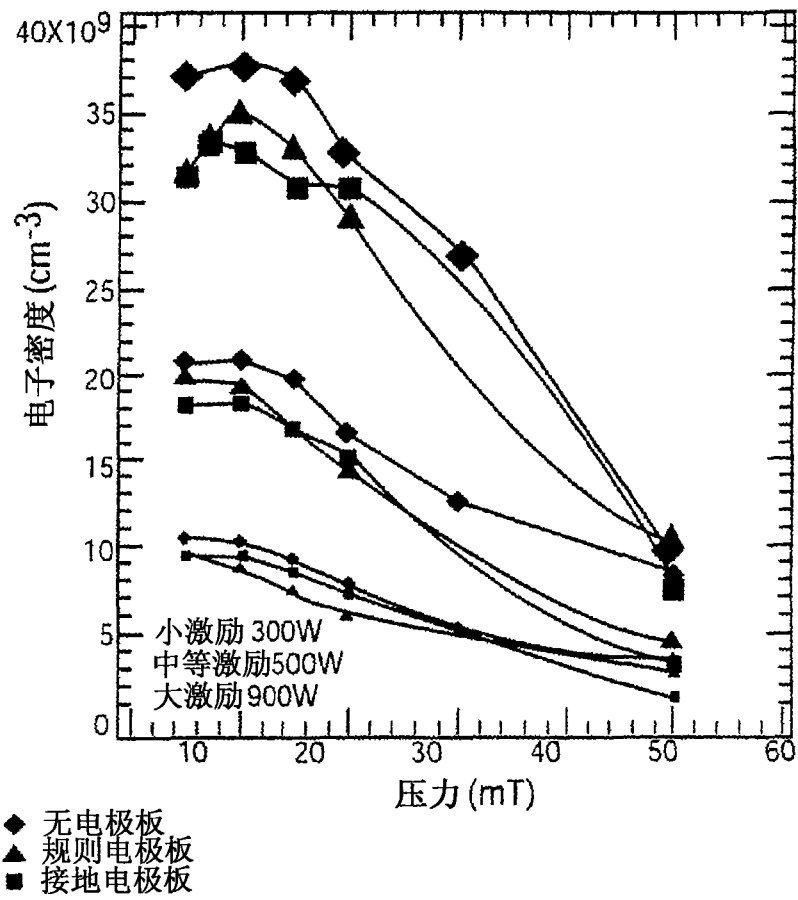


图6

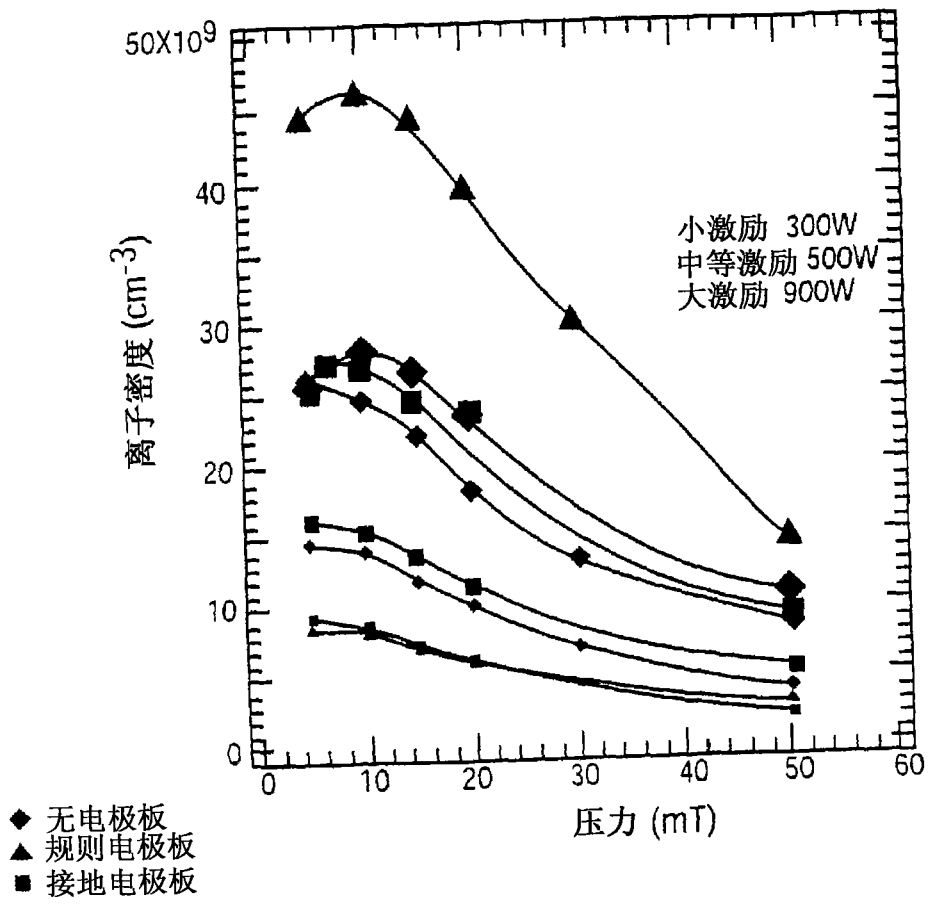
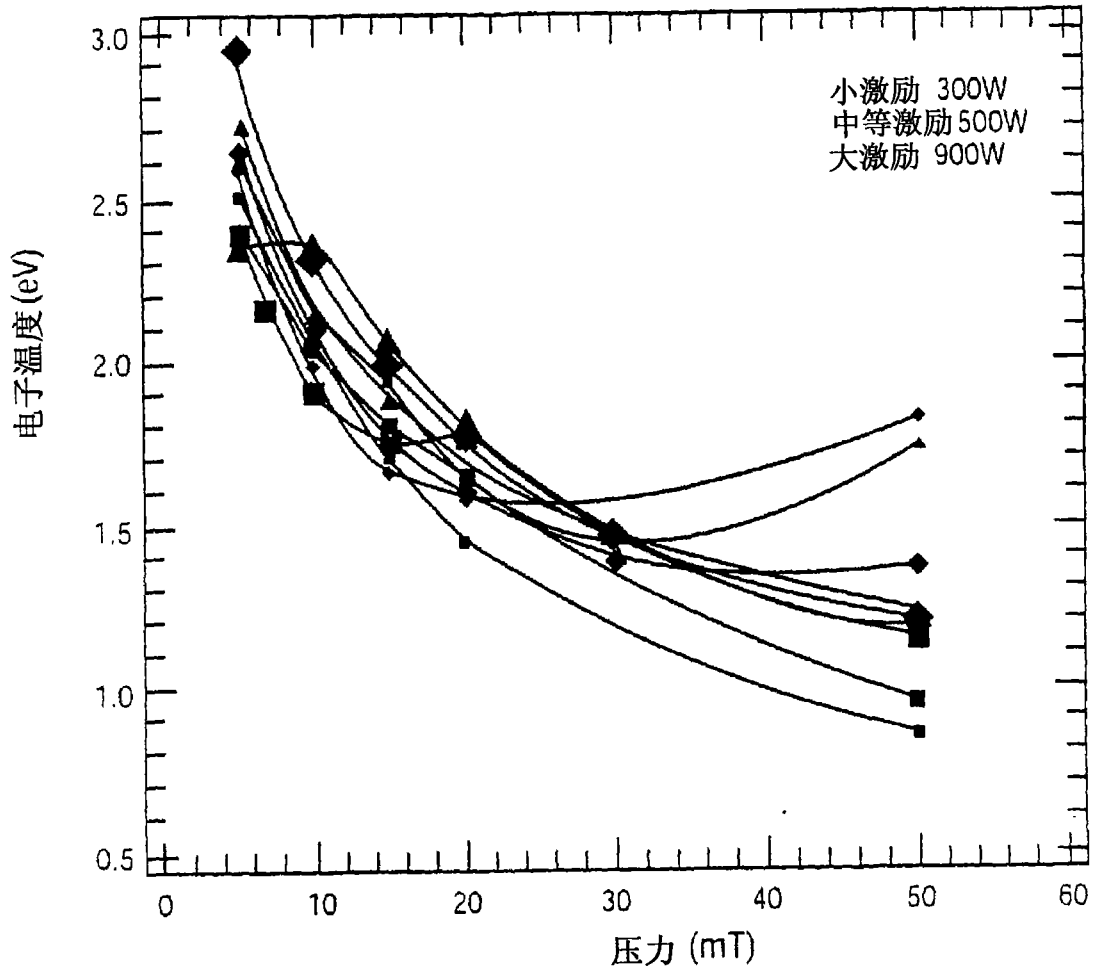


图7



- ◆ 无电极板
- ▲ 规则电极板
- 接地电极板

图8

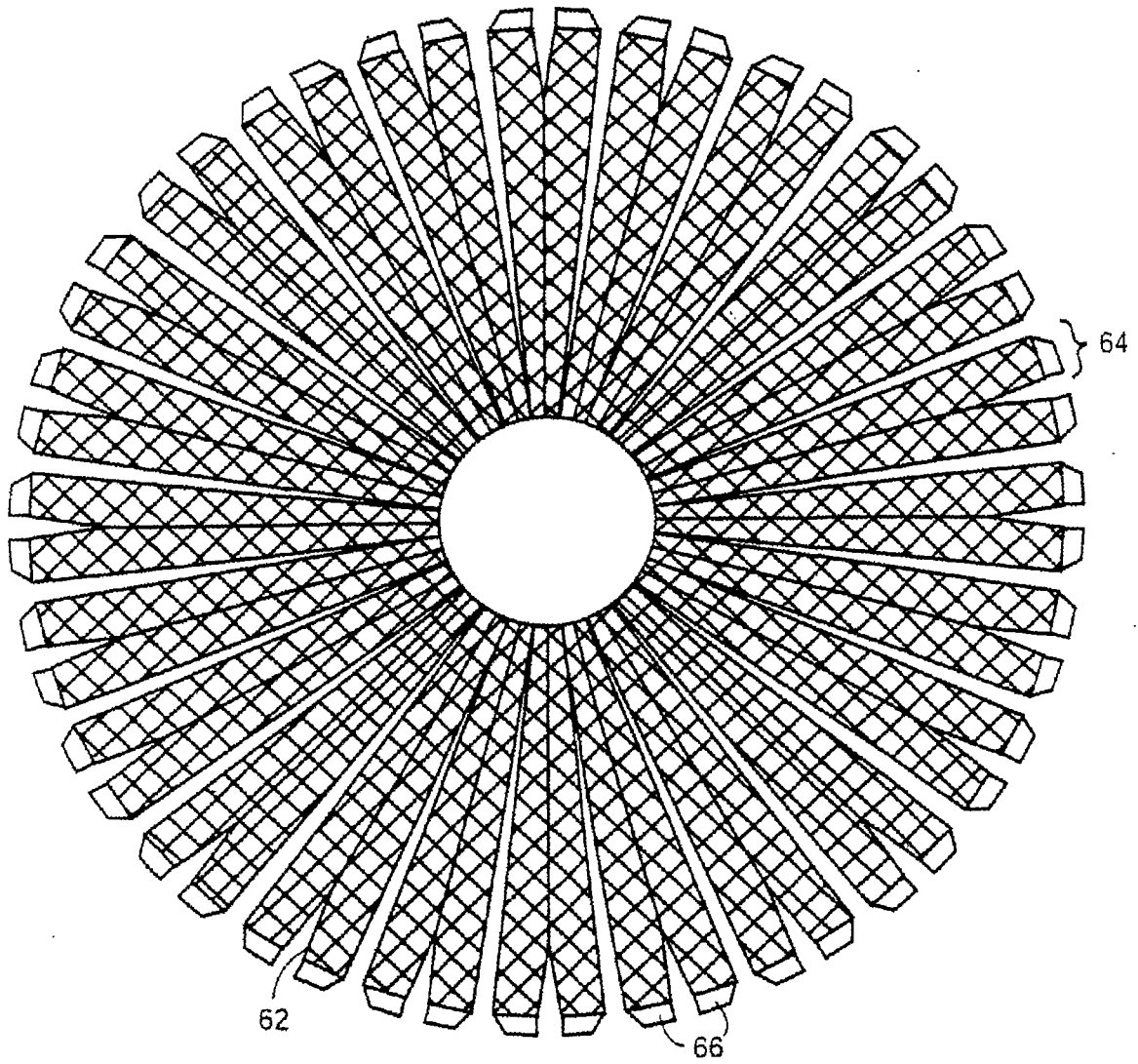


图9

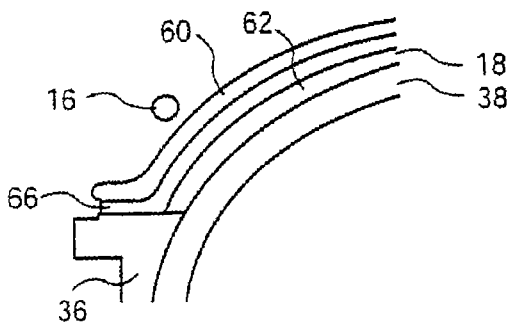
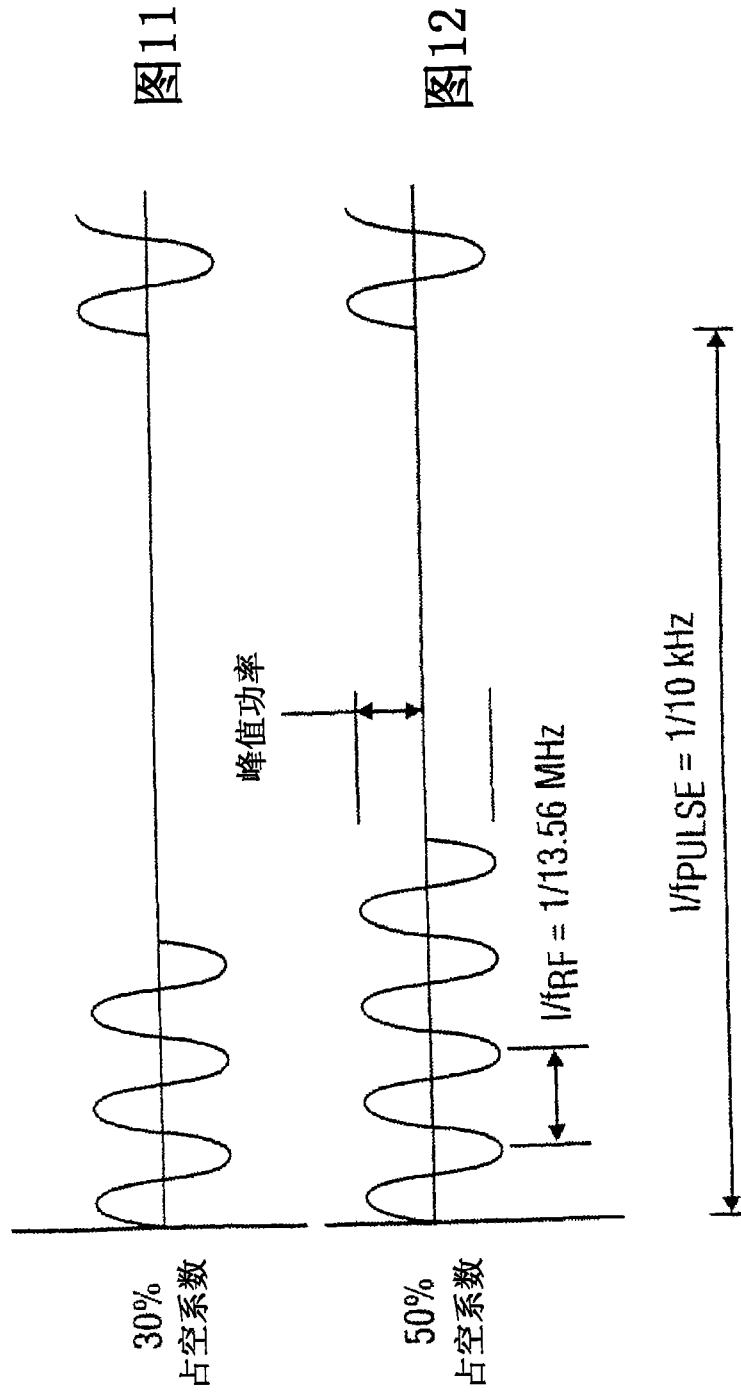


图10



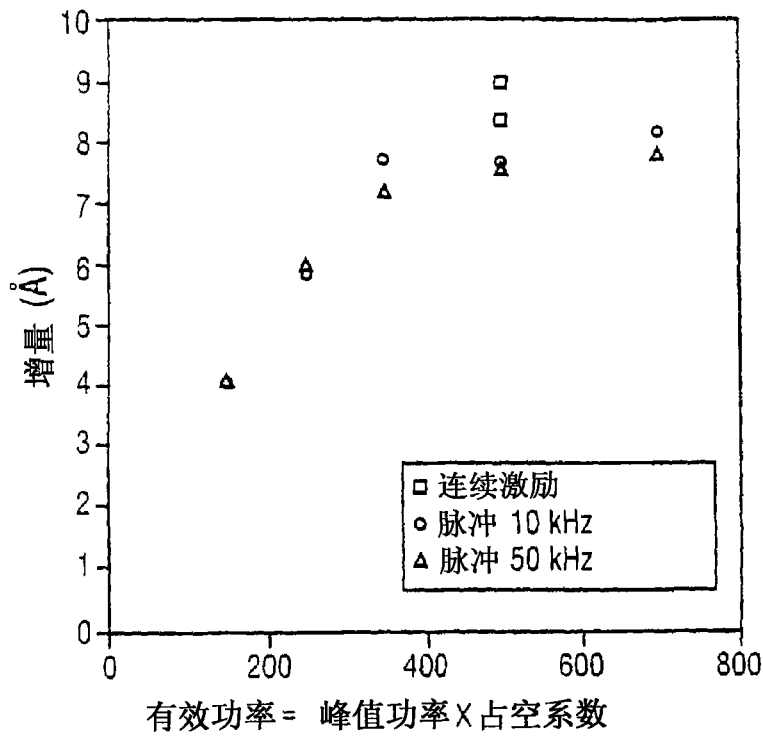


图13

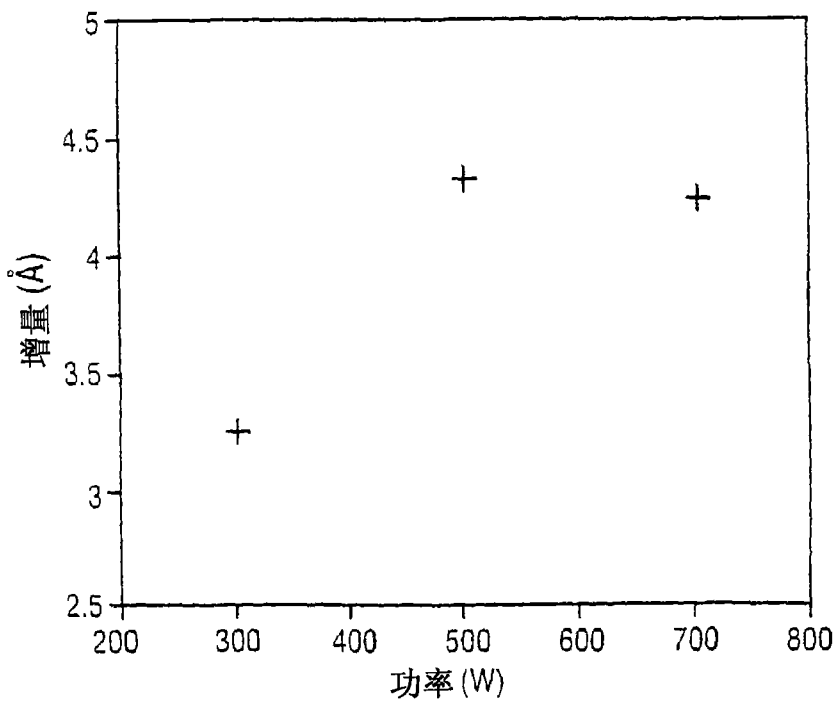


图14

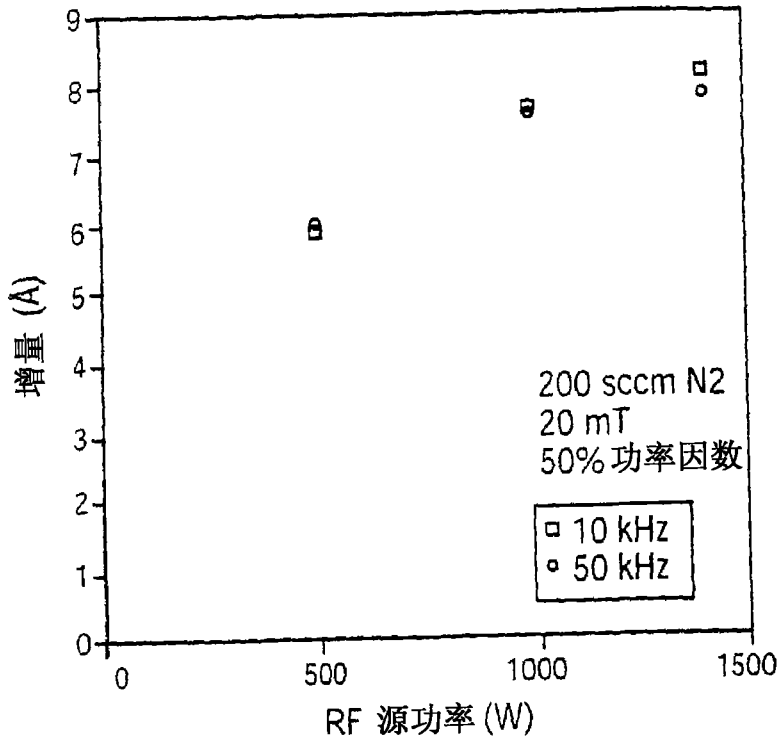


图15

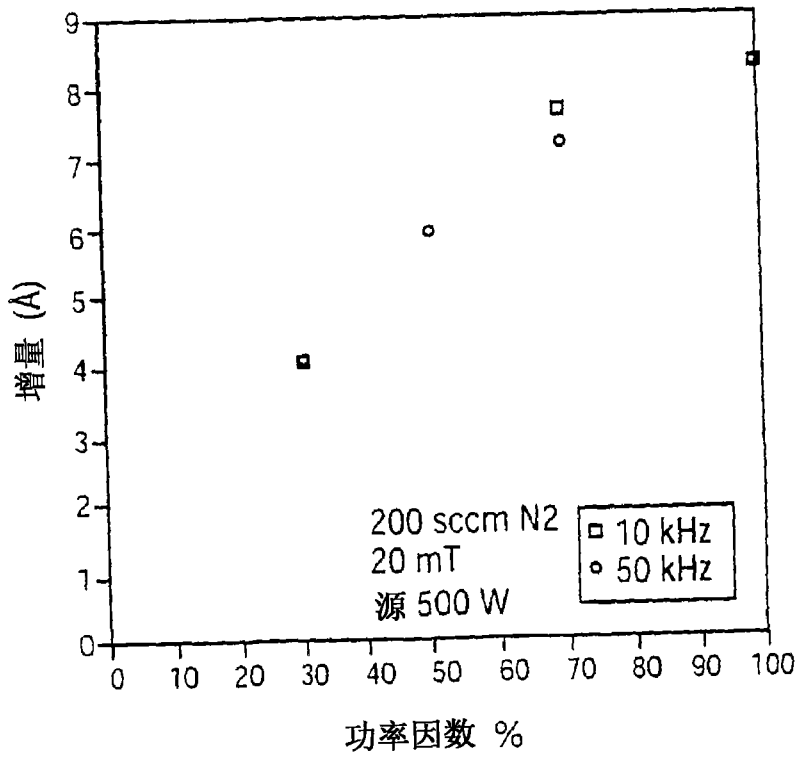


图16

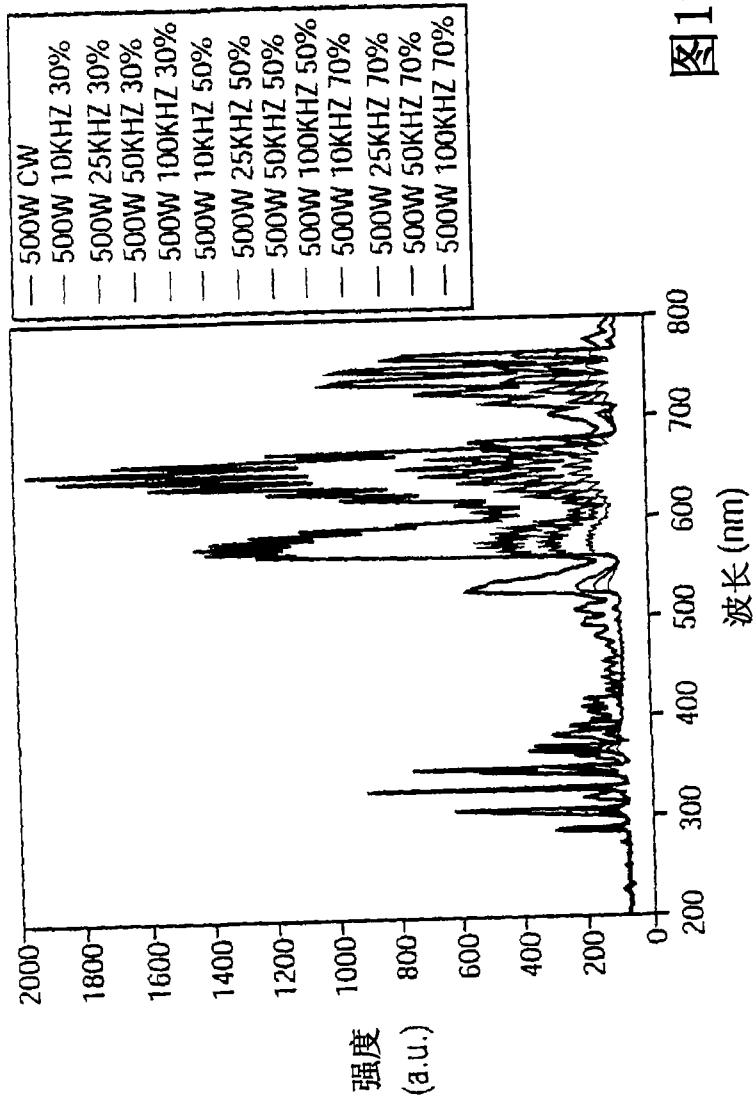


图17

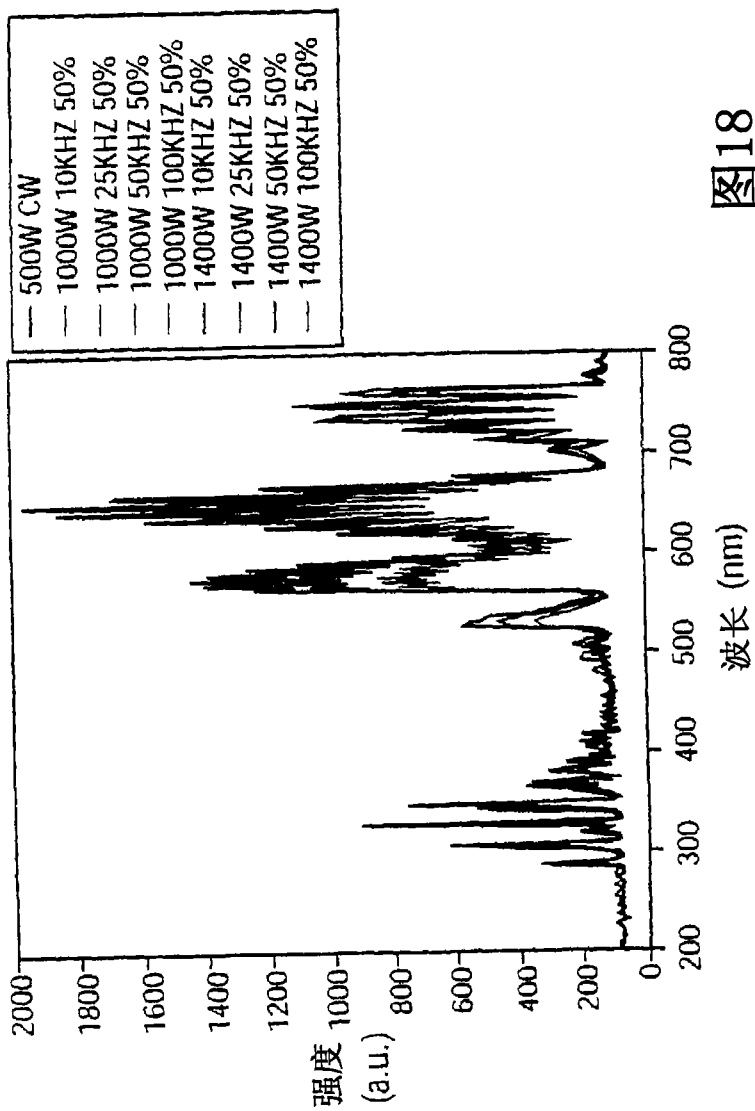


图18

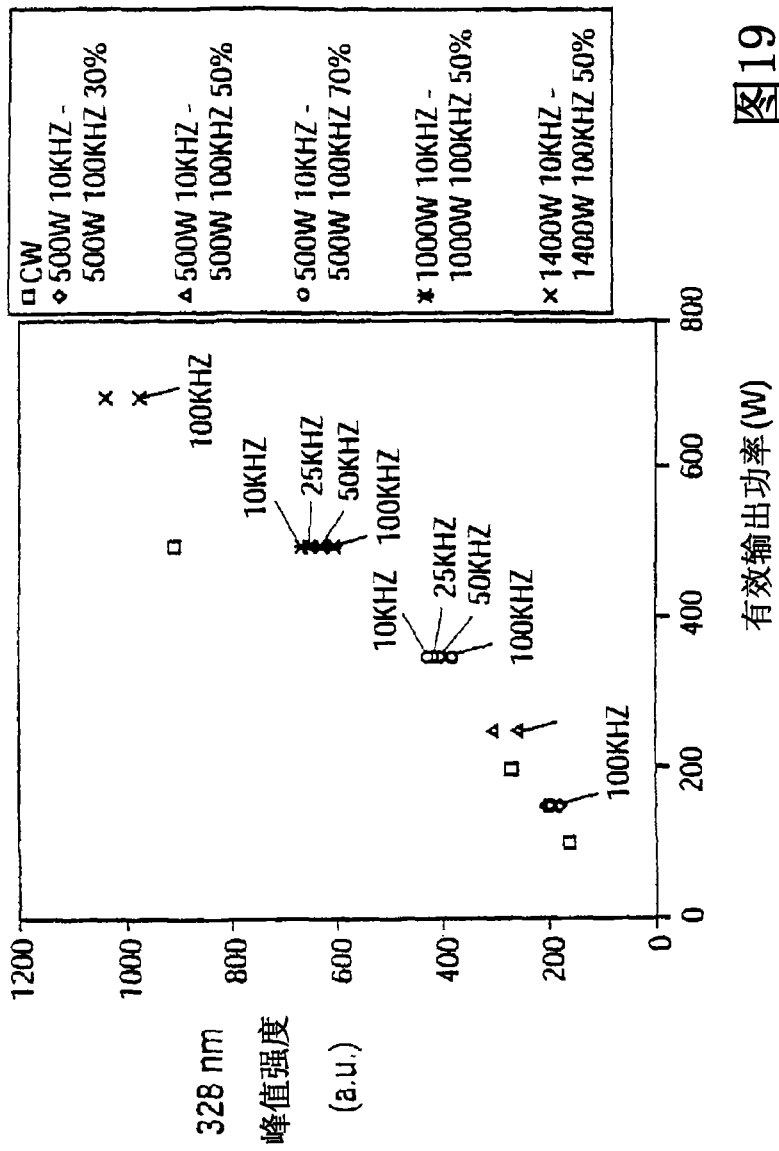


图19

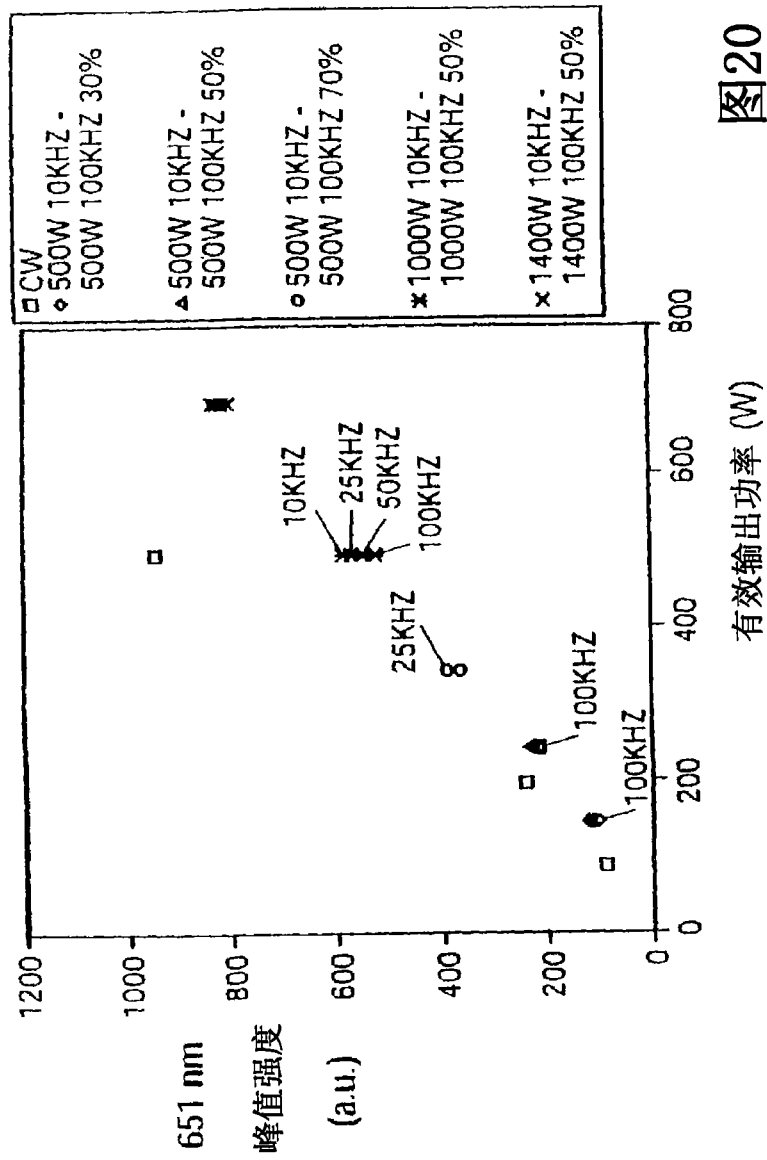


图20

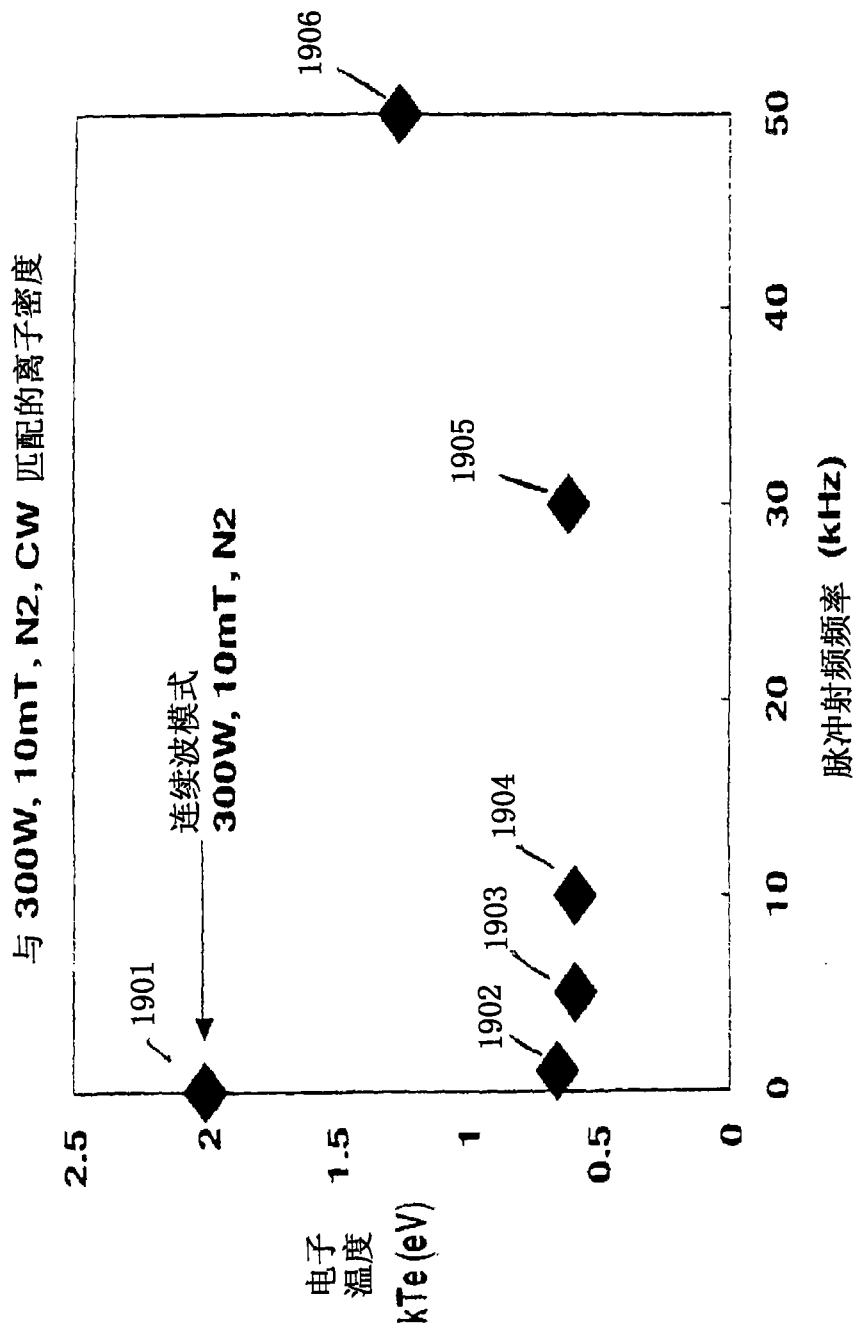


图21

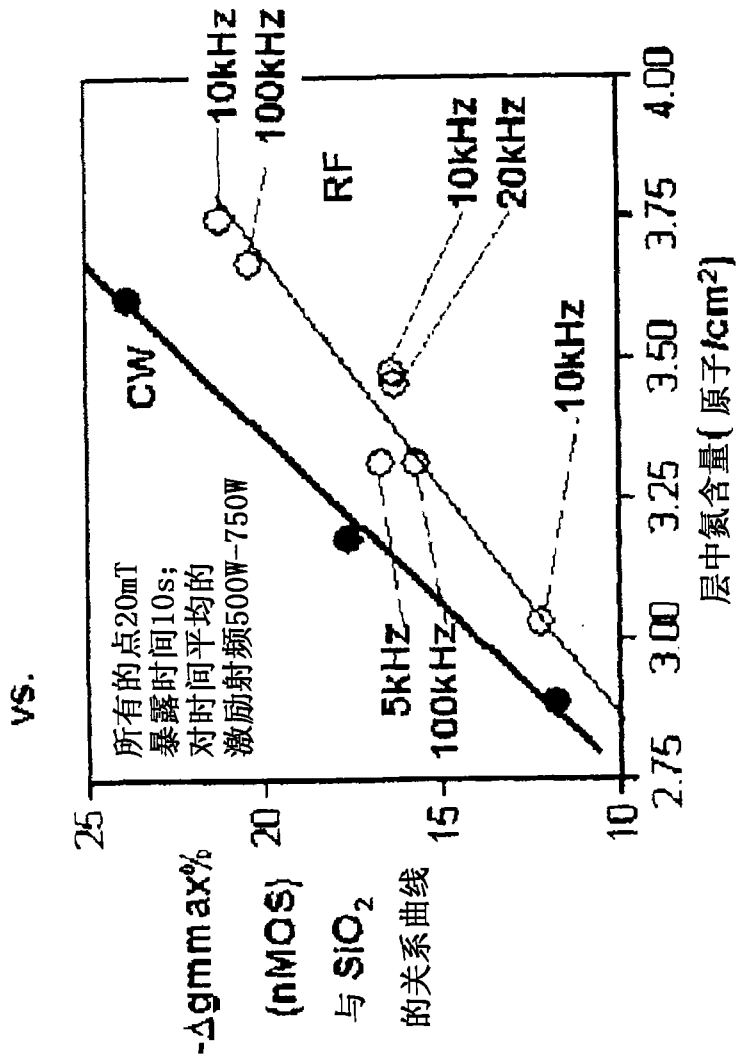


图22

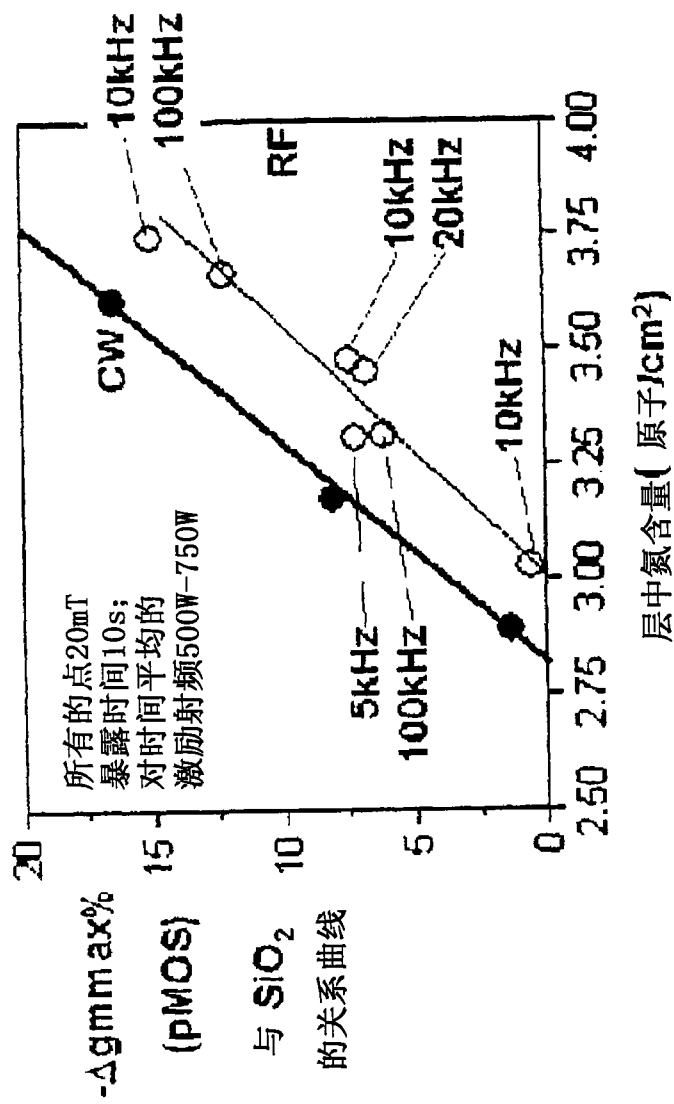


图23