(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101277580 B
(45)授权公告日 2013.01.02

(21)申请号 200810090518.3
(22)申请日 2008.03.26
(30)优先权数据
2007-082014 2007.03.27 JP
(73)专利权人 株式会社东芝
地址 日本国东京都港区芝浦一丁目1番1号
(72)发明人 宇井明生 市川尚志 玉置直树 林久贵 小岛章弘
(74)专利代理机构 上海市华诚律师事务所 31210
代理人 徐申民 张惠萍
(51)Int.Cl.
H01L 21/00(2006.01)
H05H 1/46(2006.01)
H01J 37/32(2006.01)

(56)对比文件
JP 昭62-111429 A,1987.05.22,
JP 昭62-111429 A,1987.05.22,
JP 特开2002-367962 A,2002.12.20,
JP 特开2000-156370 A,2000.06.06,
JP 特开2005-307349 A,2005.11.04,
JP 特开平9-326383 A,1997.12.16,
JP 特开2006-148156 A,2006.06.08,
JP 特开平7-74159 A,1995.03.17,

审查员 刘时雄

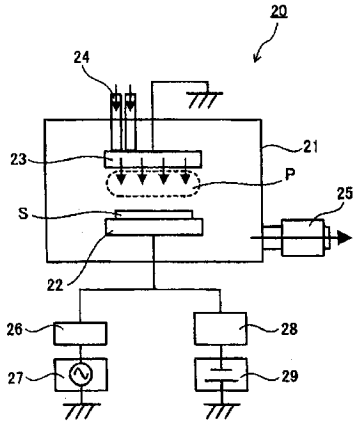
权利要求书 2 页 说明书 11 页 附图 9 页

(54)发明名称

基板的等离子处理装置

(57)摘要

本发明提供一种在平行平板型等离子处理装置中具有适于基板加工的离子能量，还可使该离子能量宽度减小来精细控制加工形状的基板的等离子处理装置。等离子处理装置构成为包括：内部保持真空的室；配置于其内部、并构成为在主面上保持要处理的基板的RE电极；以及与该RF电极相对配置的对置电极；用于对所述RE电极外加规定频率的RE电压的RE电压外加装置；以及用于对所述RF电极外加规定的脉冲电压以便其与所述RF电压叠加的脉冲电压外加装置。所述脉冲电压外加装置具有调整所述脉冲电压的所述外加的定时、并设定不外加所述脉冲电压的停止时间的控制机构。



CN 101277580 B

1. 一种基板的等离子处理装置，其特征在于，具有：

内部可保持真空的室；

配置于所述室内，并构成为在主面上保持要处理的基板的 RF 电极；

在所述室内与所述 RF 电极相对配置的对置电极；

用于对所述 RF 电极外加 RF 电压的 RF 电压外加装置；以及

用于对所述 RF 电极外加负脉冲电压以便所述脉冲电压与所述 RF 电压叠加的脉冲电压外加装置，

所述脉冲电压外加装置具有调整所述脉冲电压的外加时间 t4、并设定不外加所述脉冲电压的脉冲停止时间 t3 的控制机构，

由所述控制机构进行控制使得所述脉冲电压的连续外加脉冲数 n1 满足 $n1 < \varepsilon o \ \varepsilon s/(ZeNivbt4) \times (Vmax/d)$

其中，所述脉冲电压的外加时间 t4 的单位是 s，

所述脉冲停止时间 t3 的单位是 s，

εo 为真空介电常数，

εs 为加工的沟槽底部的介电常数，

Z 为离子价数，

e 为电子单位电量，

Ni 为离子密度，

vb 为离子束速度 $vb = (kTe/Mi)^{1/2}$，

d 为底部绝缘体膜厚，

Vmax/d 为绝缘耐压，

k 为玻尔兹曼系数，

Te 为电子温度，其单位为 K，

Mi 为离子质量，其单位为 K g。

2. 如权利要求 1 所述的基板的等离子处理装置，其特征在于，

由所述 RF 电压外加装置加到所述 RF 电极上的所述 RF 电压的频率、即 $\omega rf/2\pi$ 大于等于 50MHz，

所述脉冲电压外加装置的所述控制机构至少控制所述脉冲电压的脉冲宽度 t1 和脉冲电压值 Vpulse，由该控制机构进行控制使得所述脉冲宽度 t1 满足 $t1 \geq 2\pi/(\omega p/5)$，所述 RF 电压的电压值 Vp-p 和所述脉冲电压值 Vpulse 的关系为 $|Vp\text{-}p| < |Vpulse|$，

其中，所述脉冲宽度 t1 的单位是 s，

所述脉冲电压值 Vpulse 的单位是 V，

ωrf 为 RF 电压的角频率，

ωp 为等离子角频率，

$\omega p = (e^2No/\varepsilon oMi)^{1/2}$，

e 为电子单位电量，

εo 为真空介电常数，

Mi 为离子质量，其单位是 kg，

No 为等离子密度，其单位是个 $/m^3$。

3. 如权利要求 1 所述的基板的等离子处理装置，其特征在于，

由所述 RF 电压外加装置加到所述 RF 电极上的所述 RF 电压的频率、即 ωrf/2π 大于等于 50MHz，

所述脉冲电压外加装置的所述控制机构至少控制所述脉冲电压的脉冲宽度 t1 和重复时间 t2，由该控制机构进行控制使所述脉冲宽度 t1 和所述重复时间 t2 满足 $2\pi/\omega rf < t1 < t2 < 2\pi/(\omega p/5)$

其中，所述脉冲宽度 t1 的单位是 s，

所述重复时间 t2 的单位是 s，

ωrf 为 RF 电压的角频率，

ωp 为等离子角频率，$\omega p = (e^2No/\varepsilon oMi)^{1/2}$，

e 为电子单位电量，

εo 为真空介电常数，

Mi 为离子质量，其单位是 kg，

No 为等离子密度，其单位是个 $/m^3$。

4. 如权利要求 1 所述的基板的等离子处理装置，其特征在于，

所述脉冲电压外加装置的所述控制机构进行控制使所述脉冲电压的外加时间 t4 满足 $t4 < \varepsilon o \varepsilon s/(ZeNivb) \times (Vmax/d)$

其中，所述脉冲电压的外加时间 t4 的单位是 s，

εo 为真空介电常数，

εs 为加工的沟槽底部的介电常数，

Z 为离子价数，

e 为电子单位电量，

Ni 为离子密度，

vb 为离子束速度 $vb = (kTe/Mi)^{1/2}$，

d 为底部绝缘体膜厚，

Vmax/d 为绝缘耐压，

k 为玻尔兹曼系数，

Te 为电子温度，其单位为 K，

Mi 为离子质量，其单位是 kg。

5. 如权利要求 1 所述的基板的等离子处理装置，其特征在于，

具有蚀刻终点检测装置和衬底变化检测装置中至少一个，

由所述检测装置改变脉冲电压的外加时间 t4、脉冲停止时间 t3、以及脉冲电压 Vpulse 中至少一个。

基板的等离子处理装置

技术领域

[0001] 本发明涉及在真空室内 RF 电极和对置电极互相相对配置，并利用两者间生成的等离子对保持在所述 RF 电极上的基板进行加工的所谓平行平板型等离子处理装置。

背景技术

[0002] 对半导体晶片等的基板进行布线等作业之际，需要对所述基板实施精细的加工处理，因此以往常常使用采用等离子的处理装置。

[0003] 现有的等离子处理装置中，高频 (RF) 电极和对置电极互相相对配置于抽排至预定真空度的真空室内，并将要用于处理的基板保持于 RF 电极的与对置电极相对的主面上，构成所谓平行平板型等离子处理装置。其构成为如箭头所示将等离子生成以及利用其进行的基板加工所要使用的气体从所述气体导入管导入真空室内，同时用未图示的真空泵从排气口将真空室内抽排成真空。

[0004] 然后，通过由 13.56MHz 的商用 RF 电源经过匹配器将 RF（电压）加到 RF 电极上，从而在 RF 电极和对置电极之间生成等离子。

[0005] 这时，等离子中的正离子利用 RF 电极上所产生的负的自偏置电位 Vdc 高速入射至 RF 电极上的基板。其结果是，利用此时的基板入射能量来引发基板上的表面反应，进行反应性离子蚀刻 (RIE)、CVD（化学气相沉积）、溅射、离子注入等这类等离子基板处理。尤其是从加工基板的角度考虑，主要采用 RIE。因而，下面尤其围绕用 RIE 法的基板处理进行具体说明。

[0006] 如上所述的等离子处理装置中，RF 功率增大的同时 Vdc（平均的基板入射能量）亦增大，为了调整处理速率、调整加工形状，主要利用 RF 功率进行 Vdc 的调整。另外，Vdc 所依赖的压力或电极形状也能够进行部分调整。

[0007] 但如上所述装置内所生成的等离子当中离子能量被分成低能量侧峰值和高能量侧峰值这两部分，其能量宽度 ΔE 随等离子产生条件为数 10 ～数 100(eV)。所以，即便是将 Vdc 调整为最适合基板处理的能量的情形，入射基板的离子仍存在能量过高的离子（高能量侧峰值）和能量过低的离子（低能量侧峰值）。

[0008] 因而，例如 RIE 中，用能量与高能量侧的峰值相当的离子实施基板处理的情况下，往往会引发溜肩（坍肩）造成加工形状变差。另一方面，用能量与低能量侧的峰值相当的离子实施基板处理的情况下，往往由于小于等于表面反应阈值而对基板处理完全不起作用，或随各向异性变差（离子入射角度因热速度而有所扩展）造成加工形状变差。

[0009] 最近的半导体工艺中，为了适应越来越精细的半导体器件・各种膜・复合膜的 RIE，并对加工形状进行精细控制，需要收窄离子能量的频带（实现较小的 ΔE) 和对平均能量值进行优化调整（优化 Vdc)。

[0010] 为了收窄离子能量的频带，正对 RF 频率的高频化（专利公开平 2003-234331 号公报）或脉冲等离子化 (J.Appl.Phys.Vol86No2643(2000)) 加以研究。

[0011] 而且，等离子的生成可大体分为电感耦合型和电容耦合型，但出于对加工形状精

密控制的考虑，为了抑制次级反应缩小等离子体积、缩短滞留时间较为有效，基于上述观点，与体积大的电感耦合型等离子相比较电容耦合型的平行平板型等离子较为有利。

[0012] 另外，也可考虑以提高 Vdc 和等离子密度的控制性能为目的对平行平板的电极导入两种不同频率的 RF、并以高频（例如 100MHz）RF 和低频（例如 3MHz）RF 分别独立控制等离子密度和 Vdc 这种方法（专利公开平 2003-234331 号公报）。这种情况下，除了高频用电源和高频用匹配器以外还设置低频用电源和低频用匹配器，并设法使上述高频 RF 和低频 RF 能相对于 RF 电极叠加。

[0013] 另一方面，出于净化工序、过程稳定的考虑，对置电极为接地电位较为有利。一旦将 RF 引导加到对置电极上，对置电极便因对置电极面所生成的 Vdc 而腐蚀，从而成为尘埃源、工艺不稳定源。因此，两种 RF 也往往叠加于设置有基板的 RF 电极上。

[0014] 专利文献 1 ：专利公开平 2003-234331 号

[0015] 非专利文献 1 ：G. Chen，L. L. Raja，J. Appl. Phys. 96，6073(2004)

[0016] 非专利文献 2 ：J. Appl. Phys. Vol86No2643(2000)

[0017] 为了收窄离子能量的频带所研究的高频化技术，因为不跟踪离子的电场，因而收窄 ΔE 的频带方面效果较好，但能量 (Vdc) 变小。举例来说，100MHz、2.5kW(300mm 敏感器 (susceptor)、50mTorr、Ar 等离子）情形下，Vdc 的绝对值小于等于氧化膜或氮化膜的阈值（约 70eV)，加工速率极其缓慢而超出实用范围。

[0018] 另一方面，一旦加大 RF 能量而使平均能量增大的话，利用 RF 能量进行调整时由于 Vdc 和 ΔE 大致成比例，所以收窄能量频带的效果减弱。此外，为了以 100MHz 达到 Vdc100V 需要约 7kW 较大的 RF 功率，难以从市售的高频电源的输出上限 (5 ～ 10kW) 调整为足够大的离子能量。具体来说，RF 高频化技术即便可适应表面反应能量阈值较小的等离子处理，仍然存在 Vdc 调整难以适应阈值能量较大（大于等于 70eV) 的等离子处理这种困难。

[0019] 另外，两种频率 RF 的叠加，由于低频的原因造成离子能量宽度 ΔE 较大，无法期望收窄频带。

[0020] 另一方面，脉冲技术由于利用周期性的 DC 电位更为直接地控制离子能量，所以有利于对能量收窄频带和对能量值进行调整，但由于急剧的附加电压变化、电压 OFF 时等离子密度降低、再度附加电压时的大电流，等离子变得不稳定。尤其是绝缘物位于基板表面的等离子处理的情形下，所积聚的表面电荷难以在 1 个周期内逃逸，等离子会变得不稳定，直至等离子消失为止。另外，由于间歇的大电流流入，而对器件造成电气损害。因此，难以生成稳定的平行平板型脉冲等离子。

发明内容

[0021] 本发明正是鉴于上述问题，其目的在于提供一种在真空室内 RF 电极和对置电极互相相对配置、并利用两者间所生成的等离子对保持于所述 RF 电极上的基板进行加工的所谓平行平板型等离子处理装置中，具有适合于所述基板加工的离子能量，还可使该离子能量宽度减小来精细控制加工形状的基板的等离子处理装置。

[0022] 为了达到上述目的，本发明的一个方面涉及一种基板的等离子处理装置，其具有 ：内部可保持真空的室 ；配置于所述室内，并构成为在主面上保持要处理的基板的 RF 电极 ；在所述室内与所述 RF 电极相对配置的对置电极 ；用于对所述 RF 电极外加 RF 电压的 RF 电

压外加装置；以及用于对所述 RF 电极外加负脉冲电压以便所述脉冲电压与所述 RF 电压叠加的脉冲电压外加装置，所述脉冲电压外加装置具有调整所述脉冲电压的外加时间 t4、并设定不外加所述脉冲电压的脉冲停止时间 t3 的控制机构，由所述控制机构进行控制使得所述脉冲电压的连续外加脉冲数 n1 满足 $n1 < \varepsilon o \varepsilon s/(Ze\ Ni\ vb\ t4) \times (Vmax/d)$，其中，所述脉冲电压的外加时间 t4 的单位是 s，所述脉冲停止时间 t3 的单位是 s，εo 为真空介电常数，εs 为加工的沟槽底部的介电常数，Z 为离子价数，e 为电子单位电量，Ni 为离子密度，vb 为离子束速度 $vb = (kTe/Mi)^{1/2}$，d 为底部绝缘体膜厚，Vmax/d 为绝缘耐压，k 为玻尔兹曼系数，Te 为电子温度，其单位为 K，Mi 为离子质量，其单位为 Kg。

[0023] 本发明的上述方式，不仅对 RF 电极外加 RF 电压，还设法外加（叠加）脉冲电压。所以，可通过对所述脉冲电压的脉冲宽度 t1 或重复时间 t2、以及脉冲电压值 Vpulse 进行各种控制，从而将现有这种离子能量的低能量侧峰值与高能量侧峰值相比较，使其偏移至对基板加工不起作用这种极低能量范围，或者使所述低能量侧峰值和高能量侧峰值极其接近。

[0024] 前者情形，尤其通过只将离子能量的高能量侧峰值设定在最佳的能量范围内，可只用能量与该高能量侧峰值相当的离子对基板进行处理（加工）。也就是说，利用该高能量侧峰值原本具有的收窄频带的特性，同时对所述能量范围进行优化的话，便可精细控制基板的加工形状。

[0025] 而且，由于不是连续外加所述脉冲电压而是经过规定的停止时间来外加所述脉冲电压，所以能够抑制所述基板的加工部位带电，尤其是抑制底面带正电，所述离子的入射由于伴随着所述加工部位的带电的库仑力的影响而发生偏转，也可抑制因所述离子未近乎垂直入射至所述加工部位而造成的加工形状变差，不会影响到所述基板的加工形状的精细程度。此外，还可抑制所述带电等所带来的以所述基板的所述加工部位为基点的绝缘破坏（第 1 加工方法）。

[0026] 后者情形，由于低能量侧峰值和高能量侧峰值极为接近，所以也可以将它们当作一体的能量峰值。也就是说，通过使低能量侧峰值和高能量侧峰值极为接近地存在，能将它们一并作为具有收窄频带的能量宽度的单一能量峰值使用。因而，对经过该单一化处理的能量峰值的能量范围进行优化，并对所述低能量侧峰值和所述高能量侧峰值的接近程度即对经过所述单一化处理的能量峰值的收窄频带程度进行优化的话，便可利用具有与经过所述单一化处理的能量峰值相当的能量的离子来精细控制基板的加工形状。

[0027] 而且，由于不是连续外加所述脉冲电压而是经过规定的停止时间来外加所述脉冲电压，所以能够抑制所述基板的加工部位带电，尤其是抑制底面带正电，所述离子的入射由于伴随着所述加工部位的带电的库仑力的影响发生偏转，也可抑制因所述离子无法近乎垂直入射至所述加工部位而造成的加工形状变差，不会影响到所述基板的加工形状的精细程度。此外，还可抑制所述带电等所带来的以所述基板的所述加工部位为基点的绝缘破坏（第 2 加工方法）。

[0028] 如以上说明所述，按照本发明，可提供一种在真空室内 RF 电极和对置电极互相相对配置、并利用两者间所生成的等离子对所述 RF 电极上保持的基板进行加工的所谓平行平板型等离子处理装置中，具有适合于所述基板加工的离子能量，还可使该离子能量宽度减小来精细控制加工形状的基板的等离子处理装置。

附图说明

[0029] 图 1 为概要示出基板的等离子处理装置（对比例）的一例构成的示意图。

[0030] 图 2 为示出采用图 1 所示装置的情形下 RF 功率和 Vdc（平均的基板入射能量）之间关系的曲线图。

[0031] 图 3 为以 50mTorr 的氩气压力、对电极间 30mm、300mm 晶片采用 3MHz、Vrf ＝ 160V 的 RF 进行加工的情形下用连续体模型等离子模拟器 (G.Chen,L.L.Raja,J.Appl.Phys.96,6073(2004)) 对平行平板型 Ar 等离子进行模拟的结果。

[0032] 图 4 为同样以 50mTorr 的氩气压力、对电极间 30mm、300mm 晶片采用 3MHz、Vrf ＝ 160V 的 RF 进行加工的情形下用连续体模型等离子模拟器 (G.Chen，L.L.Raja，J.Appl.Phys.96,6073(2004)) 对平行平板型 Ar 等离子进行模拟的结果。

[0033] 图 5 为示出适合于基板 S 的离子能量的分布状态的曲线图。

[0034] 图 6 为概要示出本发明的基板的等离子处理装置的一例构成的示意图。

[0035] 图 7 概要示出的是用图 6 所示装置的情形下加到 RF 电极上的电压的叠加波形。

[0036] 图 8 为示出用图 6 所示的本例的等离子处理装置的情形下 Vdc（入射离子平均能量）与 RF 频率的相关性的曲线图。

[0037] 图 9 为示出离子能量宽度 ΔEi(eV) 与入射离子平均能量 Vdc 的相关性的曲线图。

[0038] 图 10 为示意性地表示在加工基板时设置脉冲电压停止时间情形下相对于时间的电压外加曲线的曲线图。

[0039] 图 11 为示意性地表示与图 10 的电压外加曲线相对应的在加工过程中沟槽内部带电状况的曲线图。

[0040] 图 12 示意性图示的是加工过程中沟槽的形状。

[0041] 图 13 为示出图 6 所示的等离子处理装置的变形例的构成图。

[0042] 图 14 为示出实施例中离子能量分布状态的曲线图。

[0043] 图 15 为示出实施例中脉冲电压的占空比和平均离子能量 Vdc 之间关系的曲线图。

[0044] 图 16 为同样示出实施例中离子能量分布状态的曲线图。

[0045] （标号说明）

[0046] 10、20（基板的）等离子处理装置

[0047] 11、21 室

[0048] 12、22RF 电极

[0049] 13、23 对置电极

[0050] 14、24 气体导入管

[0051] 15、25 排气口

[0052] 16、26 匹配器

[0053] 17、27RF 电源

[0054] 28 低通滤波器

[0055] 29 脉冲电源

[0056] 32 蚀刻终点检测监视器或基底变化检测监视器

[0057] S 基板

[0058] P 等离子

具体实施方式

[0059] 下面基于实施本发明用的具体实施方式详细说明本发明的基板的等离子处理装置。

[0060] 本发明一例中，由所述 RF 电压外加装置加到所述 RF 电极上的所述 RF 电压的频率（ωrf/2π）大于等于 50MHz，所述脉冲电压外加装置的所述控制机构至少控制所述脉冲电压的脉冲宽度 t1(s) 和脉冲电压值 Vpulse(V)，由该控制机构进行控制使得所述脉冲宽度 t1 成立 $t1 \geq 2\pi/(\omega p/5)$（ωp 为等离子角频率，$\omega p = (e^2No/\varepsilon oMi)^{1/2}$，e：电子单位电量，εo：真空介电常数，Mi：离子质量 (kg)，No：等离子密度（个 /m^3)），脉冲电压值 Vpulse 为 $|Vp-p| < |Vpulse|$（Vp-p 为所述 RF 电压的电压值）。由此，能够以简易且良好的状态实施上述第 1 加工方法。这里，ωrf 为 RF 电压的角频率。

[0061] 另外，本发明一例中，由所述 RF 电压外加装置加到所述 RF 电极的所述 RF 电压的频率（ωrf/2π）大于等于 50MHz，所述脉冲电压外加装置的所述控制机构至少控制所述脉冲电压的脉冲宽度 t1(s) 和重复时间 t2(s)，由该控制机构进行控制使得所述脉冲宽度 t1 和所述重复时间 t2 成立 $2\pi/\omega rf < t1 < t2 < 2\pi/(\omega p/5)$（ωp 为等离子角频率，$\omega p = (e^2No/\varepsilon oMi)^{1/2}$，e：电子单位电量，εo：真空介电常数，Mi：离子质量 (kg)，No：等离子密度（个 /m^3)）。由此，能够以简易且良好的状态实施上述第 2 加工方法。

[0062] 另外，上述任一例中，之所以使所述 RF 电压外加装置加到所述 RF 电极上的所述 RF 电压的频率（ωrf/2π）大于等于 50MHz，是由于要使 RF 电压所引起的平均基板入射能量 Vdc 为不影响基板处理这类足够低的值的缘故。换言之，本发明的上述实施方式中，之所以对 RF 电极始终外加 RF 电压，其原因是要高效生成等离子、以及即便是基板上沉积有绝缘性膜的情形也要高效生成等离子并用该等离子实现基板加工等。

[0063] 因而，本发明的上述实施方式便可主要利用叠加于 RF 电压上的脉冲电压来进行基板处理。

[0064] 而且，随着 RF 电压频率的增高，入射至基板的离子能量的低能量侧峰值和高能量侧峰值间的离子能量宽度 ΔEi 减小。所以，通过使 RF 电压的频率增大、尤其使其大于等于 50MHz，便如上所述，使所述低能量侧峰值和高能量侧峰值极其接近，并收窄频带视为单一的能量峰值、利用其能量与经过单一化处理的能量峰值相当的离子进行基板加工是比较有利的。

[0065] 另外，本发明中上述脉冲电压可以为负脉冲电压。通常，通过外加 RF 电压生成等离子的情况下，被外加所述 RF 电压的 RF 电极根据自偏压原理而为负电位。所以，所述 RF 电极附近的正离子受到向负电位侧偏移的周期性的电压 (RF 电压）的影响，将该 RF 电压作为加速电压冲击基板，对所述基板进行加工等处理。根据上述观点，使所述脉冲电压为正电压的话，便会部分抵消所述 RF 电压，会无法对所述正离子形成良好的加速电压。

[0066] 因而，可通过将上述脉冲电压设定为负脉冲电压来避免上述那样的问题。

[0067] 而本发明一例中，由所述脉冲电压外加装置的所述控制机构进行控制使得所述脉冲电压的连续外加脉冲数 n1 成立 $n1 < \varepsilon o \varepsilon s/(ZeNivbt4) \times (Vmax/d)$（εo 为真空介电常数，εs 为加工的沟槽底部的介电常数，Z 为离子价数，vb 为离子束速度 $vb = (kTe/Mi)^{1/2}$，

t4 为脉冲电压的外加时间 (s)，d 为底部绝缘体膜厚，Vmax/d 为绝缘耐压，Te 为电子温度）。由此，能够有效抑制所述基板的加工部位尤其是底部的绝缘破坏。

[0068] 此外，本发明一例中，由所述脉冲电压外加装置的所述控制机构进行控制使得所述脉冲电压的外加时间 t4 成立 $t4 < \varepsilon o \varepsilon s/(ZeNivb) \times (Vmax/d)$（$\varepsilon o$ 为真空介电常数，εs 为加工的沟槽底部的介电常数，Z 为离子价数，vb 为离子束速度 $vb = (kTe/Mi)^{1/2}$，d 为底部绝缘体膜厚，Vmax/d 为绝缘耐压）。由此，能够有效抑制所述基板的加工部位尤其是底部的绝缘破坏。

[0069] 另外，上述关系式可如下文所述推导出来。另外，各式中所使用的字符与上述关系式的附加说明中所记述的内容相同。

[0070] 最初，基板的加工部位尤其是底部所带的电荷量可用下式表示。

[0071] $Q = S \times ZeNivb(t4 \times n1)$（S：加工部位的底部面积）

[0072] 所述加工部位的静电电容可用下式表示。

[0073] $C = \varepsilon o \varepsilon s \times S/d$

[0074] 因而，这种情形加工部位底部所附加的电压 V 可用下式表示。

[0075] $V = Q/C = ZeNivb(t4 \times n1) \times d/\varepsilon o \varepsilon s$

[0076] 其结果，令使所述加工部位的底部不发生绝缘破坏而能够外加的电压最大值为 Vmax，由于必须满足 $Vmax > V$ 的关系，所以将上述关系式着眼于所外加的脉冲电压，以该脉冲数 n1 和脉冲电压的外加时间 t4 进行整理的话，便可得到如上所述的关系式。

[0077] 而本发明一例中，由所述脉冲电压外加装置的所述控制机构进行控制使得所述脉冲电压的电压值 Vpulse(V) 成立 $(vtherm/vdc)^{1/2} \leqslant 0.5L1/L2$（离子的热速度 vtherm 为 $vtherm = (8kTe/\pi Mi)/2$，$vdc = (2eZxVpulse/Mi)^{1/2}$，L1 为加工的沟槽宽度，L2 为沟槽深度）。通过满足上述条件，上述等离子中的离子便相对于所述基板的加工部位（沟槽）到达其底部而非冲击其侧壁。所以，能够提高所述基板的加工效率。

[0078] 此外，本发明一例中，可由所述脉冲电压外加装置的所述控制机构进行控制使得所述脉冲连续外加后的脉冲停止时间 t3 成立 $n1 \times t4 \leqslant t3$。这种情况下，与所述脉冲电压的外加时间相比较，使此后的停止时间延长，所以能够有效抑制如上所述基板的加工部位的带电。

[0079] 而且，上述基板的等离子处理装置可具有蚀刻终点检测装置和基底变化检测装置中至少一个，由此可设法使脉冲电压的外加时间 t4、脉冲停止时间 t3、以及脉冲电压 Vpulse 中至少一个改变。由此，便可将基板的加工状况立刻反映为加工条件，所以能够对所述基板进行精细且有效的加工。

[0080] 另外，本发明中所谓的“RF 电压外加装置”可包含本领域的技术人员能够理所当然想到的 RF 发生器和阻抗匹配器。另外，根据需要也可包含适当的放大器。

[0081] 此外，本发明中所谓的“脉冲外加装置”，除了本领域的技术人员能够理所当然想到的脉冲发生器以外，还可包含适当的放大器和低通滤波器。

[0082] 还鉴于如上所述的本发明的附加特征，将本发明的基板的等离子处理装置和方法与其它的基板的等离子处理装置和方法进行对比并加以说明。

[0083] （采用基板的等离子处理装置的对比例）

[0084] 图 1 为概要示出现有的基板等离子处理装置这一对比例的构成的示意图。

[0085] 图 1 所示的基板的等离子处理装置 10 中，高频 (RF) 电极 12 和对置电极 13 互相相对配置于抽排至预定真空度的真空室 11 内，并将要用于处理的基板 S 保持于 RF 电极 12 的与对置电极 13 相对的主面上，构成所谓的平行平板型等离子处理装置。其构成为如箭头所示将等离子生成以及利用其进行的基板 S 加工所要使用的气体从所述气体导入管导入真空室 11 内，同时用未图示的真空泵从排气口 15 将真空室 11 内抽排成真空。这时真空室 11 内的压力为例如约 1Pa 左右。

[0086] 然后，通过由 13.56MHz 的商用 RF 电源 17 经过匹配器 16 将 RF（电压）加到 RF 电极 12 上，从而在 RF 电极 12 和对置电极 13 之间生成等离子 P。

[0087] 这时，等离子 P 中的正离子利用 RF 电极 12 上所产生的负的自偏置电位 Vdc 高速入射至 RF 电极 12 上的基板 S。其结果是，利用此时的基板入射能量来引发基板 S 上的表面反应，进行反应性离子蚀刻 (RIE)、CVD（化学气相沉积）、溅射、离子注入等这类等离子基板处理。尤其是从加工基板的角度考虑，主要采用 RIE。因而，下面尤其围绕用 RIE 法的基板处理进行具体说明。

[0088] 图 1 所示这种等离子处理装置中，如图 2 所示，RF 功率增大的同时 Vdc（平均的基板入射能量）亦增大，为了调整处理速率、调整加工形状，主要利用 RF 功率进行 Vdc 的调整。另外，Vdc 所依赖的压力或电极形状也能够进行部分调整。

[0089] 图 3、图 4 为用连续体模型等离子模拟器 (G.Chen，L.L.Raja，J.Appl.Phys.96，6073(2004)) 对 3MHz、Vrf ＝ 160V、50mTorr、电极间 30mm、300mm 晶片尺寸的平行平板型 Ar 等离子进行模拟的结果。另外，图 5 为示出适合于基板 S 的离子能量的分布状态的曲线图。

[0090] 如图 3 所示，由于 RF 电极电位周期性变动，因而离子的基板入射能量也周期性变动。但由于存在离子质量对电位跟踪的迟滞，所以离子能量以小于 Vrf 的振幅 Vrf’随时间变动。离子能量准确来说为 Vdc 和等离子电位 Vp 两者之和，但 Vp 值和随时间的变化相对较小，所以其说明以及图 3 中均有所省略。因此，入射至基板 S 的能量通过对图 3 所示的曲线进行时间积分，从而变成为图 4 所示这种分布。

[0091] 从图 4 可知，图 1 所示这种装置内所生成的等离子当中离子能量可分为低能量侧峰值和高能量侧峰值这两者，其能量宽度 ΔE 根据等离子发生条件为数 10 ～数 100(eV)。因而，即便是将 Vdc 调整为最适于基板处理的能量的情况下，也会如图 5 所示进行基板入射的离子当中存在能量过高的离子（高能量侧峰值）和能量过低的离子（低能量侧峰值）。

[0092] 因而，例如 RIE 方法中，用能量与高能量侧峰值相当的离子实施基板处理的情况下，往往会引发溜肩（坍肩）造成加工形状变差。另一方面，用能量与低能量侧峰值相当的离子实施基板处理的情况下，往往因小于等于表面反应阈值而对基板处理完全不起作用，或随各向异性变差（离子入射角度因热速度而有所扩展）造成加工形状变差。

[0093] （采用本发明的基板的等离子处理装置的具体例）

[0094] 图 6 为概要示出本发明的基板等离子处理装置的具体例的构成的示意图。图 7 概要示出的是用图 6 所示装置的情形下加到 RF 电极上的电压的叠加波形。另外，主要围绕 RIE 法说明采用上述等离子处理装置情形的等离子处理方法。

[0095] 如图 6 所示，本例中的基板的等离子处理装置 20 中，高频 (RF) 电极 22 和对置电极 23 互相相对配置于抽排至预定真空度的真空室 21 内，并将要用于处理的基板 S 保持于 RF 电极 22 的与对置电极 23 相对的主面上，构成所谓的平行平板型等离子处理装置。其构

成为如箭头所示将等离子生成以及利用其进行的基板 S 加工所要使用的气体从所述气体导入管 24 导入室 21 内，同时用未图示的真空泵从排气口 25 将室 21 内抽排成真空。

[0096] 作为所述气体来说，除了使用 Ar、Kr、Xe、N_2、O_2、CO、H_2 等气体之外，还可适当使用 SF_6 或 CF_4、C_2F_6、C_4F_8、C_5F_8、C_4F_6、Cl_2、HBr、SiH_4、SiF_4 等加工气体。另外，室 21 内的压力可根据对基板 S 的加工速度或所使用气体的种类等适当设定，但可保持为例如数 Pa 量级。

[0097] 接下来，从 RF 电源 27 经过匹配器 26 将 RF（电压）加到 RF 电极 22 上的同时，还设法从脉冲电源 29 经过低通滤波器 28 同样将脉冲电压加到 RF 电极 22 上。于是，如图 7 所示 RF 电压和脉冲电压以叠加的状态加到 RF 电极 22 上。由此，RF 电极 22 和对置电极 23 间便可生成等离子 P，该等离子 P 当中的正离子由 RF 电极 22 上的负电压（平均能量为 Vdc）加速来高速入射基板 S，对基板 S 进行加工处理。

[0098] 另外，RF 电源 27 和脉冲电源 29 内可以根据需要内置用于将上述电源所发出的 RF 电压和脉冲电压放大的放大器。

[0099] 上述脉冲电压较好为负的脉冲电压。如上所述，等离子 P 当中的正离子由于 RF 电极 22 上所产生的负电压作用而高速入射至 RF 电极 22 上的基板 S，对基板 S 进行加工处理。另外，图 7 中虽未具体示出，但也如图 3 所示的那样，外加于 RF 电极 22 的 RF 电压根据上述自偏置电位，主要在负电压值区域变化。因而，使所述脉冲电压为正电压的话，就会部分抵消所述 RF 电压，对于所述正离子无法形成良好的加速电压。

[0100] 因而，可通过使上述脉冲电压为负的脉冲电压，来避免上述问题产生。

[0101] 图 8 为示出用图 6 所示的本例的等离子处理装置外加 RF 的情形下 Vdc（入射离子平均能量）与 RF 频率的相关性的曲线图。图 9 为示出离子能量宽度 ΔEi(eV) 与入射离子平均能量 Vdc 的相关性的曲线图。另外，图 8 中所示的曲线图和图 2 中所示的曲线图基本相同。

[0102] 由图 8 可知，随着外加于 RF 电极 22 的 RF 电压的频率增大，入射离子平均能量 Vdc 减小，尤其是 RF 功率小于等于 2.2W/cm^2 量级，RF 频率超过 50MHz 的话，便成为不影响基板处理这种阈值约小于等于 50eV。而且，即便是超过 2.2W/cm^2 这种 RF 能量，Vdc 与 RF 频率的相关性也极小。因而可以知道，通过使外加于 RF 电极 22 的 RF 频率大于等于 50MHz，从而 RF 电压不会影响基板处理，只有（负）脉冲电压的控制对基板处理有影响。

[0103] 换言之，因为可以只通过（负）脉冲电压的控制来调整基板处理的状态，所以能够简化对于基板处理的操作，可以使其操作便利性有较大的提高。

[0104] 因而，本例中尤其是对 RF 电极 22 始终外加 RF 电压，其主要目的是高效生成等离子、以及即便是基板 S 上沉积有绝缘性膜的情形也能高效生成等离子并用该等离子实现基板加工等。

[0105] 而且，如图 9 所示，同样对于 Vdc，随着 RF 电压的频率增大，如图 4 所示的入射至基板的离子能量其低能量侧峰值和高能量侧峰值间的离子能量宽度 ΔEi 减少。所以，使 RF 电压频率增大，尤其增大为大于等于 50MHz，对如下面详细叙述的那样使所述低能量侧峰值和高能量侧峰值极其靠近并收窄频带来当作单一的能量峰值，用能量与经过该单一化处理的能量峰值相当的离子进行基板加工是有利的。

[0106] 用未图示的例如脉冲电源 29 内所内置的规定的控制机构进行控制，使得脉冲电源 29 所生成的脉冲电压的脉冲宽度 t1(s) 和脉冲电压值 Vpulse(V) 成立 $t1 \geq 2\pi/(\omega p/5)$

(ωp 为等离子角频率，$\omega p = (e^2No/\varepsilon oMi)^{1/2}$，e：电子单位电量，εo：真空介电常数，Mi：离子质量 (kg)，No：等离子密度（个 /m^3)），脉冲电压值 Vpulse 为 |Vp-p| ＜ |Vpulse|(Vp-p 为所述 RF 电压的电压值）。

[0107] 这种情况下，由于离子能够跟踪脉冲电压，所以在时间上对该离子能量进行积分，获得图 4 所示的曲线图的情况下，低能量侧峰值便偏移至对处理没有影响这种极低能量区域。因而，通过只将高能量侧峰值设定在最合适的能量范围内，能够只用该高能量侧峰值对基板进行处理（加工）。也就是说，利用该高能量侧峰值原本具有的收窄频带的特性，同时优化上述能量范围的话，便能够精细控制基板的加工形状（第 1 加工方法）。

[0108] 另外，高能量侧峰值的能量值可以由脉冲电压的电压值 Vpulse 控制。

[0109] 此外，用未图示的例如脉冲电源 29 内所内置的规定的控制机构进行控制，使得脉冲电源 29 所生成的脉冲电压的脉冲宽度 t1(s) 和重复时间 t2(s) 成立 2π/ωrf ＜ t1 ＜ t2 ＜ 2π/(ωp/5)(ωp 为等离子角频率，$\omega p = (e^2No/\varepsilon oMi)^{1/2}$，e：电子单位电量，εo：真空介电常数，Mi：离子质量 (kg)，No：等离子密度（个 /m^3))。

[0110] 这种情况下，由于离子无法跟踪脉冲电压，所以在时间上对该离子能量进行积分，获得图 4 所示这种曲线图的情况下，低能量侧峰值和上述高能量侧峰值便极其接近，可以将这两者当作一体化的能量峰值。也就是说，可通过使低能量侧峰值和上述高能量侧峰值极其接近地存在，从而将这两者一并作为具有收窄频带的能量宽度的单一能量峰值加以使用。

[0111] 因而，对经过这样单一化处理的能量峰值的能量范围进行优化，并对所述低能量侧峰值和所述高能量侧峰值的接近程度即对经过所述单一化处理的能量峰值的收窄频带程度进行优化的话，便可利用经过所述单一化处理的能量峰值来精细控制基板的加工形状（第 2 加工方法）。另外，经过上述单一化处理的能量峰值的能量值可以通过控制脉冲电压的电压值 Vpulse 和 / 或占空比来进行适当调整。

[0112] 另一方面，上述第 1 加工方法和第 2 加工方法其中任一种，连续外加脉冲电压（和 RF 电压）进行连续加工的话，基板 S 的加工部位即加工的形成过程中的沟槽（沟道）尤其是底部便会荷带正电。结果，入射沟槽内的离子等有时会受到所述荷带电荷产生的库仑力的作用而发生偏转，无法到达所述沟槽的底部，尤其难以对高宽比较大的沟槽进行加工。此外，所述沟槽底部带电的电荷量一旦增大，有时会产生以所述沟槽底部为基点的绝缘破坏。

[0113] 根据上述观点，对基板 S 进行加工形成上述沟槽的情况下，外加所述脉冲电压达到规定时间之后，最好停止外加所述脉冲电压。由此，能够有效抑制所述沟槽底部的带电，并能够消除上述各种问题。

[0114] 图 10 为示意性地表示加工基板 S 时设置脉冲电压停止时间情形下相对于时间的电压外加曲线的曲线图。图 11 为示意性地表示此时加工过程中沟槽内带电状况的曲线图。另外，上述任一图中波形 (a) 示出不设置脉冲停止时间 t3 而是连续外加脉冲电压的情形，而波形 (b) 示出设置脉冲停止时间 t3 的同时外加脉冲电压的情形。

[0115] 如图 10(b) 所示，本发明中，上述第 1 加工方法和第 2 加工方法其中任一种方法，均在外加脉冲电压达规定时间之后针对脉冲电压的外加设定脉冲停止时间 t3。于是，如图 11 中的波形 (b) 所示，外加脉冲电压过程中处于加工过程中的沟槽底部的带电量近似线性地增大，但所述脉冲电压一旦停止外加，其带电量便急剧减少。这是由于带电的正电荷经过

基板扩散而被中和所造成的。因而，能够有效抑制加工过程中的沟槽底部带电，可以抑制如上所述这种加工精度变差和绝缘破坏等。

[0116] 另一方面，如图 10(a) 所示，不设置停止时间而连续外加脉冲电压的话，如图 11 中的波形 (a) 所示处于加工过程中的沟槽底部的带电量近似线性地增大。因而，加工过程中的沟槽底部的带电量增大，用于加工的离子并未到达所述沟槽底部，精细加工变得困难，此外有时也会产生绝缘破坏。

[0117] 另外，为了有效防止以加工过程中的沟槽为基点的绝缘损坏，由脉冲电源 29 内设置的所述控制机构进行控制，使得所述脉冲电压的连续外加脉冲数 n1 成立 $n1 < \varepsilon o \varepsilon s/(ZeNivbt4) \times (Vmax/d)$（$\varepsilon o$ 为真空介电常数，εs 为加工的沟槽底部的介电常数，Z 为离子价数，vb 为离子束速度 $vb = (kTe/Mi)^{1/2}$，t4 为脉冲电压的外加时间 (s)，d 为底部绝缘体膜厚，Vmax/d 为绝缘耐压）。同样进行控制，使得所述脉冲电压的外时间 t4 成立 $t4 < \varepsilon o \varepsilon s/(ZeNivb) \times (Vmax/d)$（$\varepsilon o$ 为真空介电常数，εs 为加工的沟槽底部的介电常数，Z 为离子价数，vb 为离子束速度 $vb = (kTe/Mi)^{1/2}$，d 为底部绝缘体膜厚，Vmax/d 为绝缘耐压）。

[0118] 上述关系式考虑了不至于绝缘破坏的最大电压 Vmax(V < Vmax) 而得到所述沟槽底部带电的电荷量所产生的电压 V，其推导过程如上所述。

[0119] 而且，为了使有助于加工的离子不冲击加工过程中的沟槽的侧面，直到其沟槽底部为止，提高其加工效率，同时为了促进精细的加工，控制使得所述脉冲电压的电压值 Vpulse(V) 成立 $(vtherm/vdc)^{1/2} \leqslant 0.5L1/L2$（离子的热速度 vtherm 为 $vtherm = (8kTe/\pi Mi)/2$，$vdc = (2eZxVpulse/Mi)^{1/2}$，L1 为加工的沟槽宽度，L2 为沟槽深度）。另外，该关系式是根据如图 12 所示的沟槽形状导出的。

[0120] 而且，脉冲连续外加后的脉冲停止时间 t3 较好是控制为 $n1 \times t4 \leqslant t3$。这种情况下，与所述脉冲电压的外加时间相比，设法使其后的停止时间较长，因而能够有效抑制如上所述这种基板的加工部位的带电。

[0121] 另外，考虑等离子蚀刻时，例如硅的蚀刻在工艺过程开始时为了消除自然的氧化膜需要 200eV 左右较大的离子能量，以后的蚀刻阶段中则最好为 100eV 左右较小的离子能量，并且在氧化膜等阻挡膜（ストッパ-）出现的最后阶段出于精密加工的观点最好以 70eV 左右更小的离子能量进行蚀刻。上述工艺所需的离子能量可通过改变本发明的负脉冲的脉宽 t1、重复时间 t2、或负脉冲电压 Vpulse 中至少一个来改变加工过程，同时还能控制、切换离子能量。

[0122] 此外，外加脉冲电压时，脉冲电源中可进行周期性的充电、放电。因此，大于等于充电所需时间就无法使频率增大。而且，也难以使占空比大于等于 0.5。这种情况下，可通过准备大于等于 2 个的脉冲电源，同时用触发器将它们连接，并设法使它们在相位上互相错开叠加，结果能够获得用单一脉冲电源无法得到的、高频和 / 或占空比大于等于 0.5 的脉冲电压。

[0123] 此外，可通过改变来自大于等于 2 个的脉冲电源的电压 Vpulse，形成 Vpulse 周期性不同的阶梯形状的脉冲电压。

[0124] 图 13 为示出图 6 所示的等离子处理装置的变形例的构成图。图 13 所示的等离子处理装置在 RF 电极 22 内设置蚀刻终点检测监视器或衬底变化检测监视器 32。这样便可根据基板 S 的加工状况适当改变脉冲电压的外加时间 t4、脉冲停止时间 t3、以及脉冲电压

Vpulse 中至少一个，因而能够对基板 S 进行精细且有效的加工。

[0125] 另外，上述监视器可通过监视基板 S 的电阻值等来知道基板 S 的加工状态。

[0126] （实施例）

[0127] 下面利用实施例具体说明本发明，但本发明当然不限于以下内容。另外，下面所示的具体结果均基于规定的模拟。

[0128] （实施例 1）

[0129] 本实施例中研究用图 6 所示的等离子处理装置时的具体动作特性。

[0130] 首先，将 C_4F_8 气体和氧气导入室 21 内，并使其压力保持为 2 ～ 200mTorr。接着，RF 电源 27 对 RF 电极 22 外加 100MHz、电压 Vp-p ＝ 80V 的 RF 电压，同时脉冲电源 29 外加 10MHz、Vpulse ＝ -500V 的负电压脉冲，并使这两者互相叠加。在等离子密度 No ＝ 5×1016（个 /m^3）的 CF 离子的情况下，由于 (ωp/5)/2π 约为 1.7MHz，所以对于脉冲电压的脉冲宽度 t1(s) 和重复时间 t2(s)，满足 2π/ωrf ＜ t1 ＜ t2 ＜ 2π/(ωp/5) 这一条件，并成为离子连 DC 脉冲电压也无法追随的区域。

[0131] 因而，如图 14、图 15 所示，通过 DC 负脉冲叠加，与双频 (Dual) 叠加相比离子能量分布的频带收窄。具体来说，通过减小占空比（＝ t1/t2），离子能量分布进一步收窄频带。也就是说，可通过改变脉冲占空比，从而控制、改变与占空比大致成正比的平均能量。而且，离子的平均能量也可通过与脉冲负电压 Vpulse 或占空比组合改变进行平均能量控制。

[0132] 另外，加工过程中的沟槽底部的电压为约 50V 量级。通常，所述电压一旦超过约 200V 就会产生绝缘破坏，所以可通过如上所述抑制电压，在不至于产生上述绝缘破坏的情况下进行精细的沟槽加工。

[0133] （实施例 2）

[0134] 本实施例中也研究用图 6 所示的等离子处理装置时的具体动作特性。

[0135] 本实施例中，RF 电源 27 外加 100MHz、电压 Vp-p ＝ 80V 的 RF 电压，同时脉冲电源 29 外加 1MHz、Vpulse ＝ -250V 的负电压脉冲，并使这两者互相叠加。另外，其它条件与实施例 1 相同。

[0136] 本实施例中，因为满足脉冲宽度 t1 ≥ 2π/(ωp/5)，所以离子能够跟踪脉冲电压。因此，如图 16 所示，低能量侧峰值和高能量侧峰值互相有较大的离子能量宽度介于其间存在。另外，可通过如图 16 所示加大负电压脉冲的占空比（＝ t1/t2），从而能够维持上述离子能量宽度，保持互相间能量位置不变，使高能量侧峰值的分布状态增大。

[0137] 另外，高能量侧峰值的能量值能够用负脉冲电压的电压值 Vpulse 控制。

[0138] 本实施例中，由于高能量侧峰值的能量宽度极窄为 8(eV)，所以可通过用这种能量的离子进行基板处理来进行精细的加工。

[0139] 而且，加工过程中的沟槽底部的电压为约 50V 左右。通常，所述电压一旦超过约 200V 就会产生绝缘破坏，所以可通过如上所述抑制电压，在不至于产生上述绝缘破坏的情况下进行精细的沟槽加工。

[0140] 以上根据上述具体例对本发明进行了详细说明，但本发明并不限于上述具体例，只要不背离本发明范畴可以作各种变形或改变。

[0141] 举例来说，上述具体例中，说明的是以 RIE 为中心针对基板加工的等离子处理装置和方法，但本发明也可适当用于其它处理装置和方法。

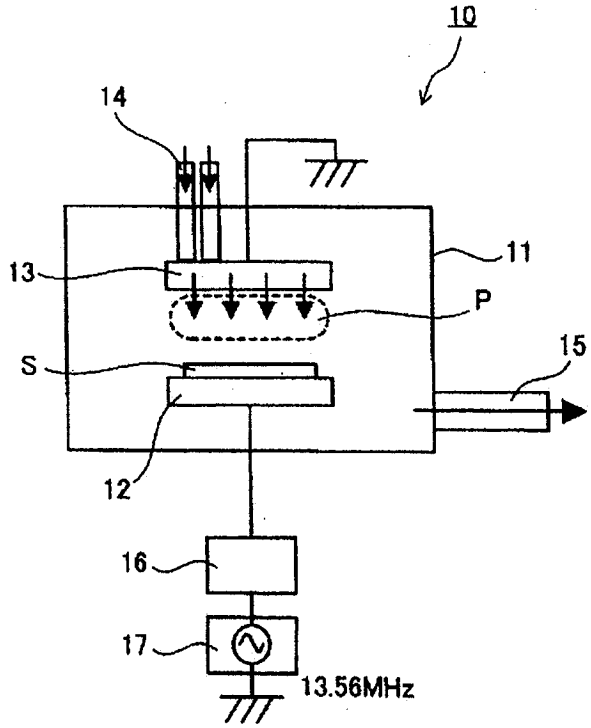

10
14
11
13
P
15
S
12
16
17
13.56MHz

图 1

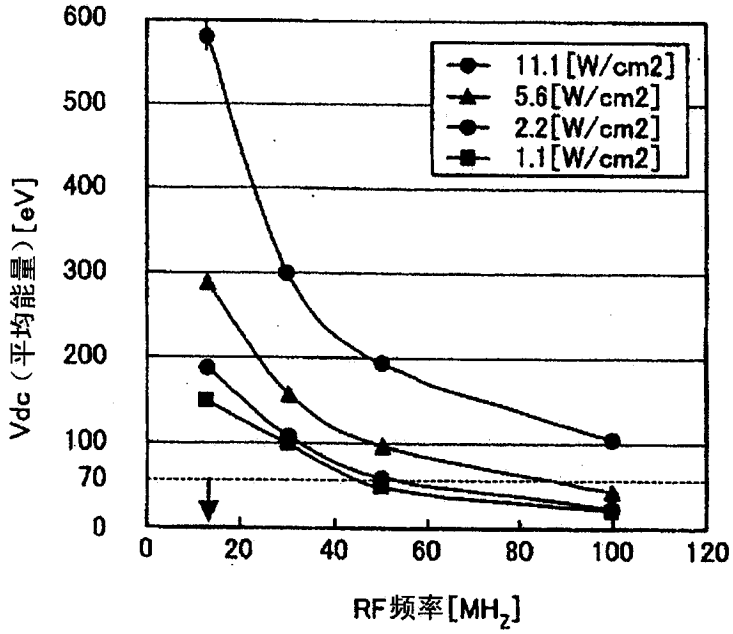

600
500
400
300
200
100
70
0
0
20
40
60
80
100
120
Vdc（平均能量）[eV]
RF频率[MHz]
11.1[W/cm2]
5.6[W/cm2]
2.2[W/cm2]
1.1[W/cm2]

图 2

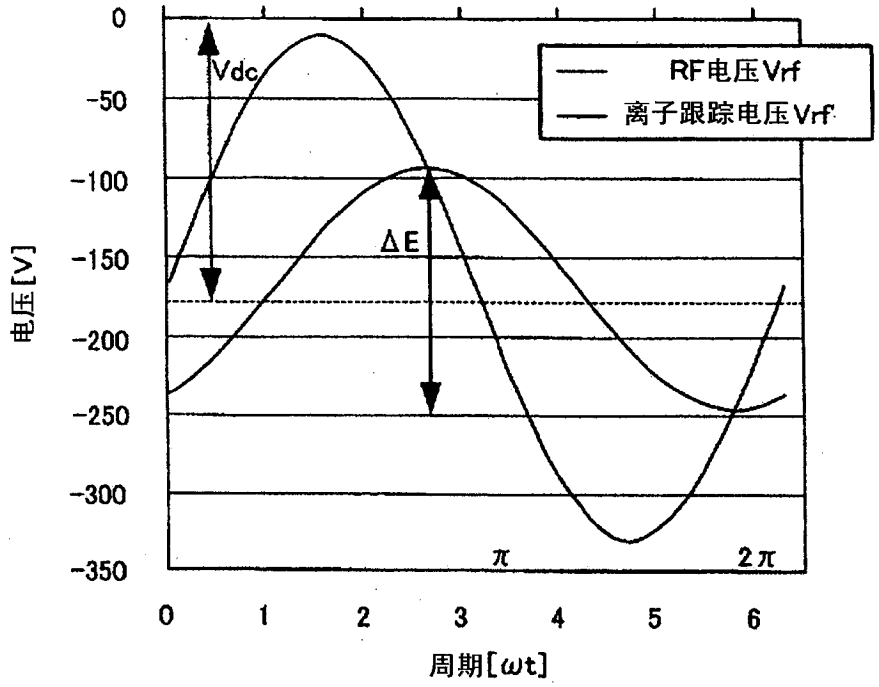

0
-50
-100
-150
-200
-250
-300
-350
电压[V]
Vdc
ΔE
RF电压Vrf
离子跟踪电压Vrf'
π
2π
0
1
2
3
4
5
6
周期[ωt]

图 3

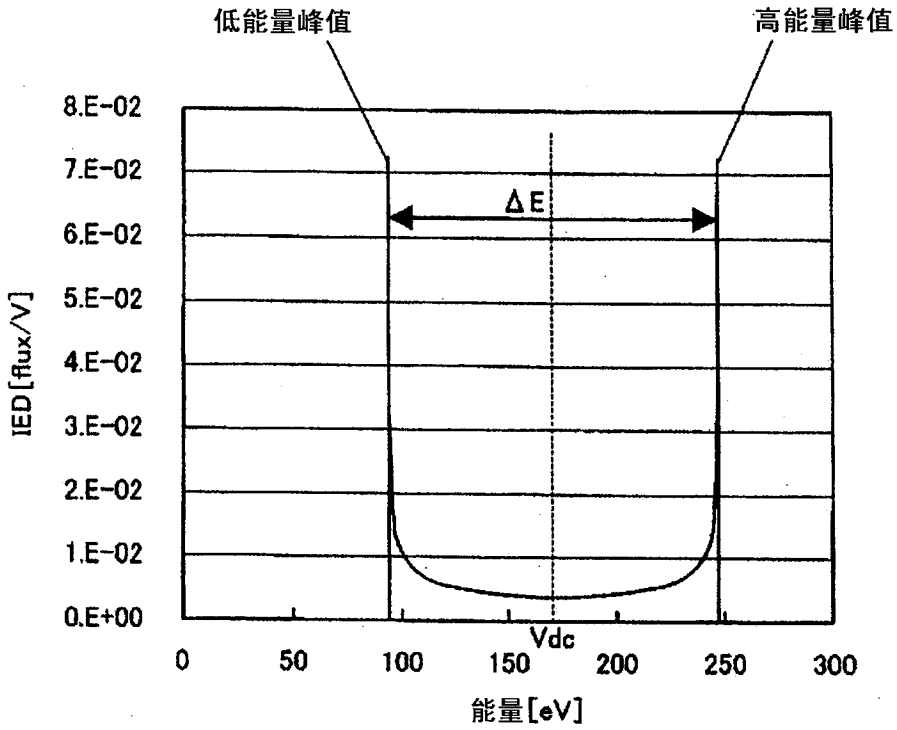

低能量峰值
高能量峰值
8.E-02
7.E-02
6.E-02
5.E-02
4.E-02
3.E-02
2.E-02
1.E-02
0.E+00
IED[flux/V]
ΔE
Vdc
0
50
100
150
200
250
300
能量[eV]

图 4

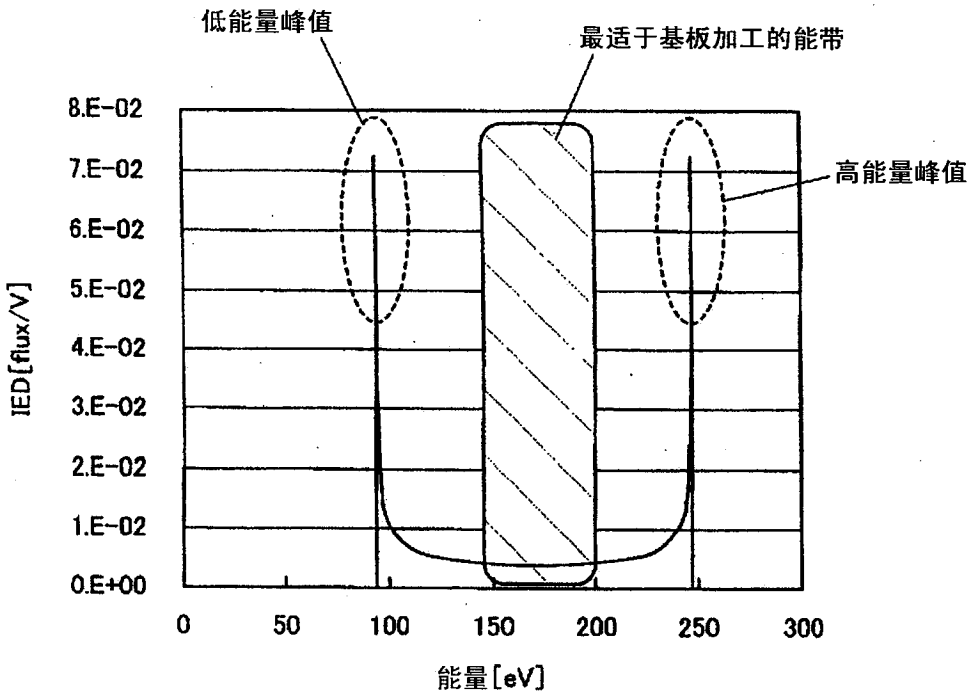

低能量峰值
最适于基板加工的能带
高能量峰值
8.E-02
7.E-02
6.E-02
5.E-02
4.E-02
3.E-02
2.E-02
1.E-02
0.E+00
IED[flux/V]
0
50
100
150
200
250
300
能量[eV]

图 5

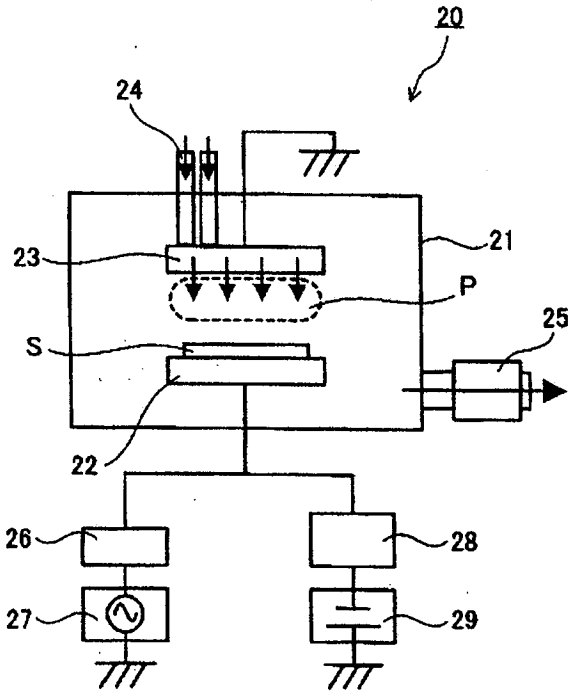

20
24
21
23
P
25
S
22
26
28
27
29

图 6

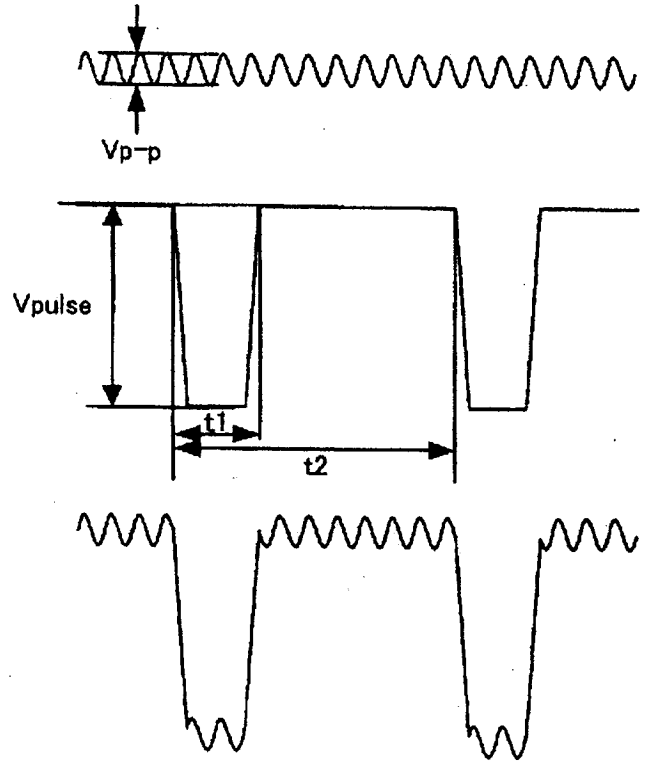

Vp-p
Vpulse
t1
t2

图 7

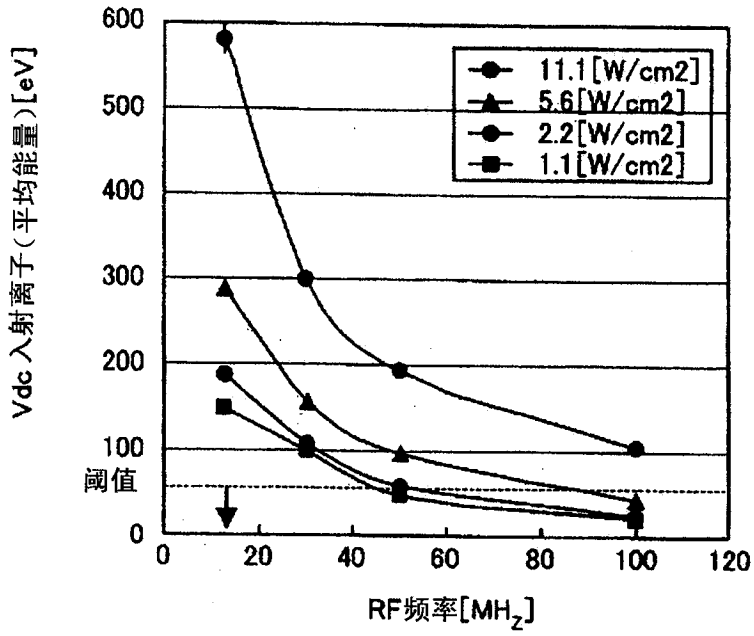

600
500
400
300
200
100
阈值
0
0
20
40
60
80
100
120
Vdc 入射离子(平均能量)[eV]
RF频率[MHz]
11.1[W/cm2]
5.6[W/cm2]
2.2[W/cm2]
1.1[W/cm2]

图 8

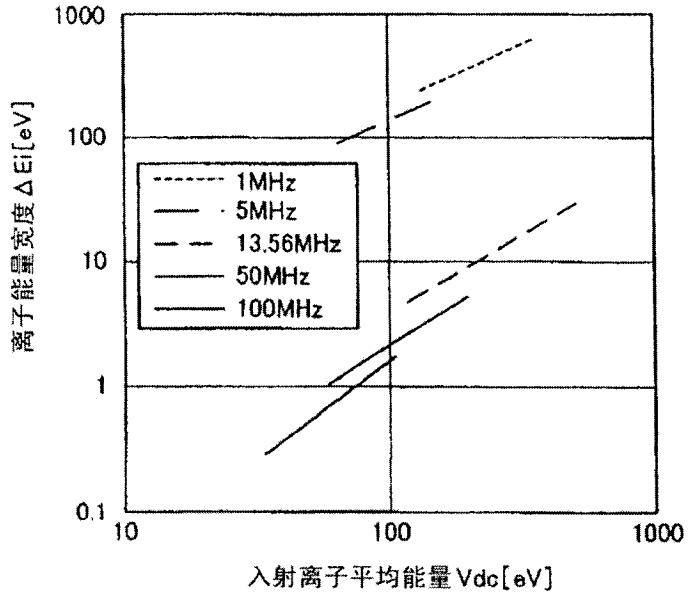

1000
100
10
1
0.1
10
100
1000
离子能量宽度 ΔEi[eV]
入射离子平均能量 Vdc[eV]
1MHz
5MHz
13.56MHz
50MHz
100MHz

图 9

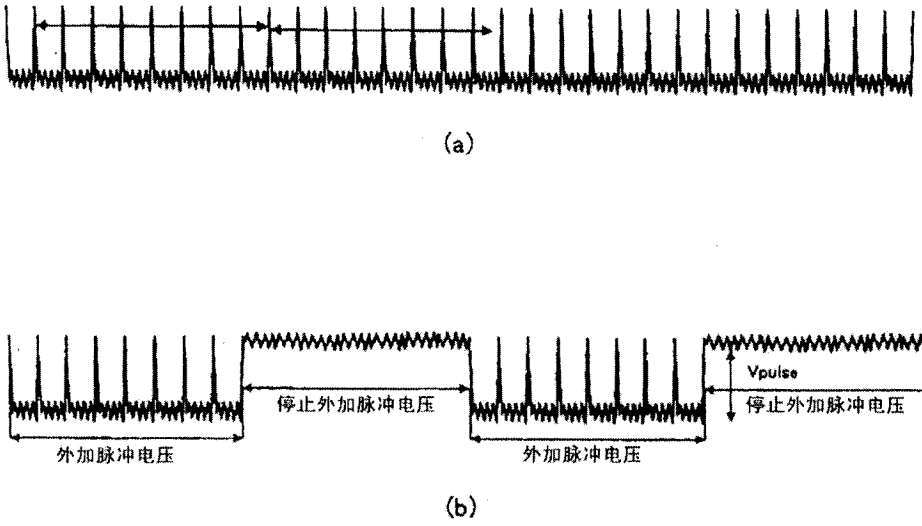

(a)
停止外加脉冲电压
外加脉冲电压
外加脉冲电压
Vpulse
停止外加脉冲电压
(b)

图 10

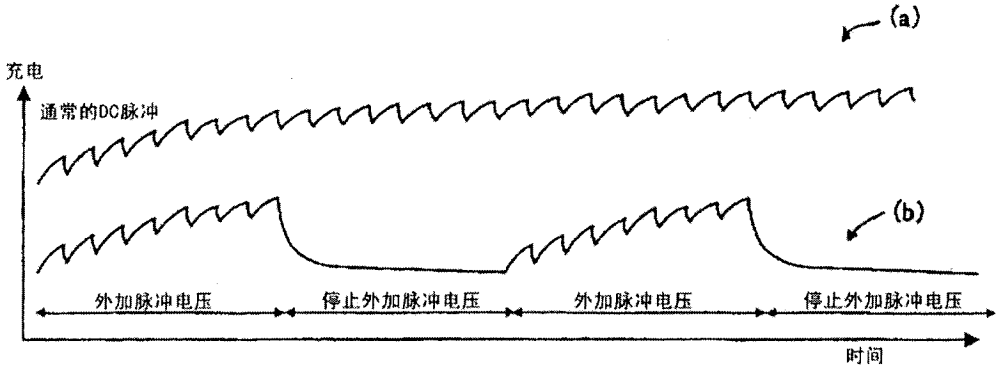

(a)
充电
通常的DC脉冲
(b)
外加脉冲电压
停止外加脉冲电压
外加脉冲电压
停止外加脉冲电压
时间

图 11

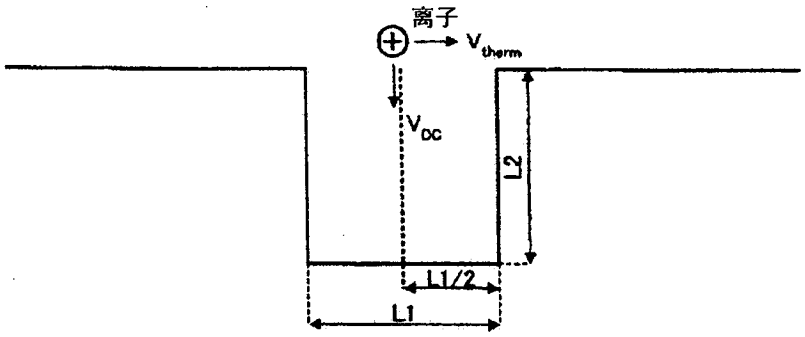

离子
V_{therm}
V_{DC}
L2
L1/2
L1

图 12

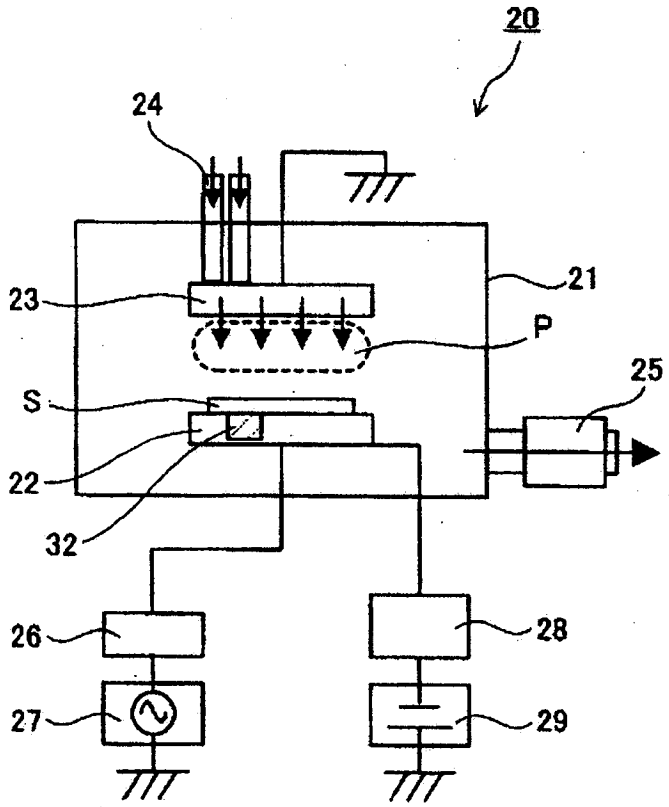

20
24
21
23
P
25
S
22
32
26
28
27
29

图 13

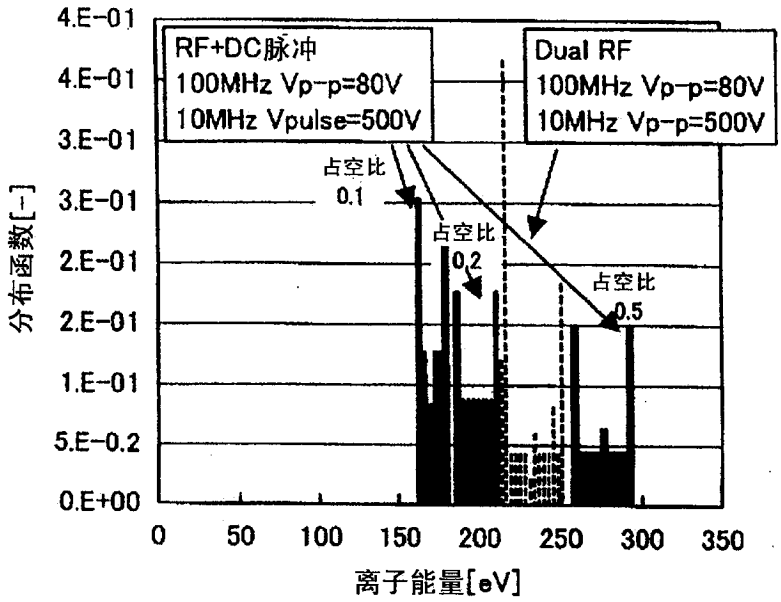

RF+DC脉冲
100MHz Vp-p=80V
10MHz Vpulse=500V
Dual RF
100MHz Vp-p=80V
10MHz Vp-p=500V
占空比
0.1
占空比
0.2
占空比
0.5
分布函数[-]
4.E-01
4.E-01
3.E-01
3.E-01
2.E-01
2.E-01
1.E-01
5.E-02
0.E+00
0
50
100
150
200
250
300
350
离子能量[eV]

图 14

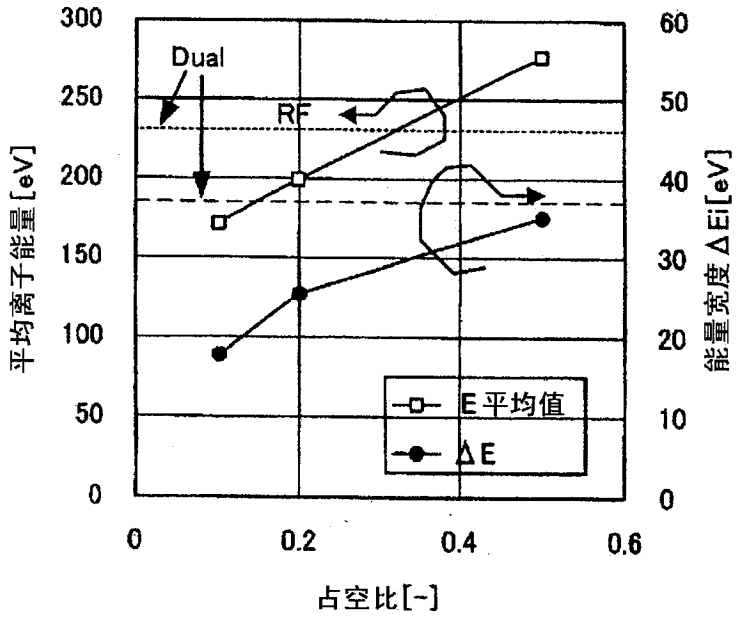
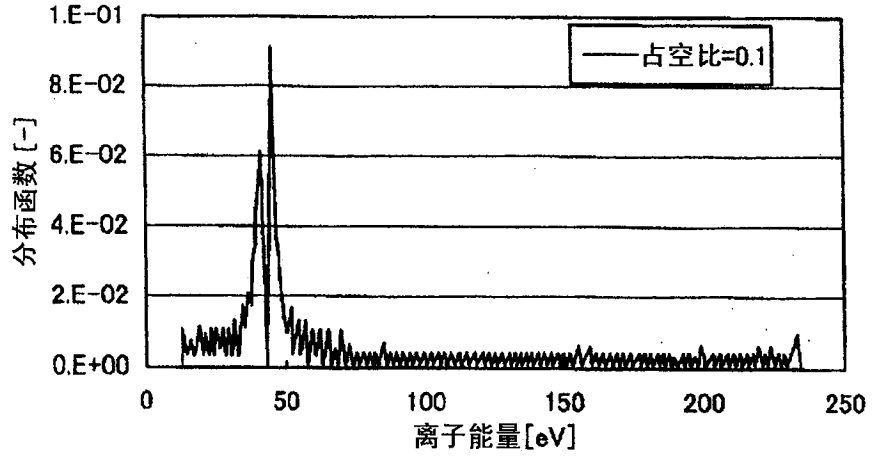
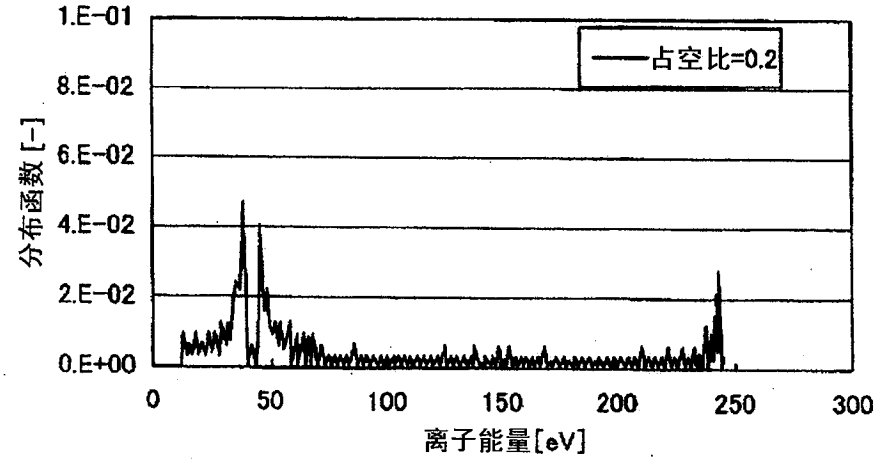

300
250
200
150
100
50
0
60
50
40
30
20
10
0
0
0.2
0.4
0.6
Dual
RF
E平均值
ΔE
平均离子能量[eV]
能量宽度ΔEi[eV]
占空比[-]

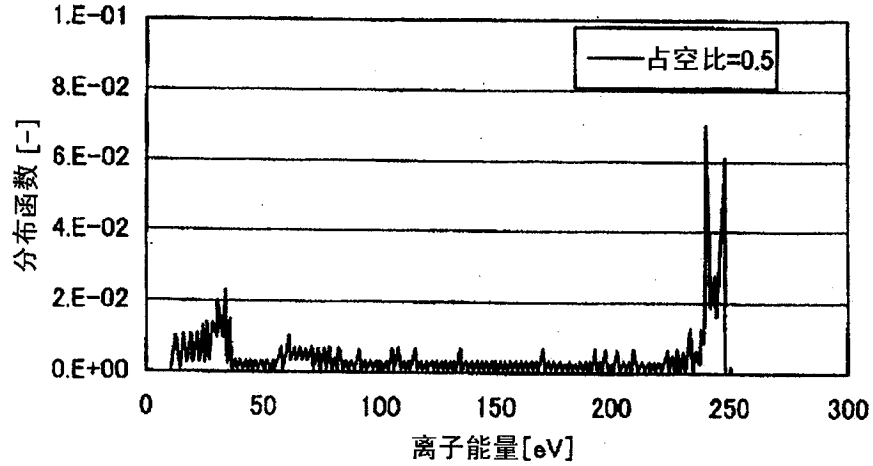
图 15


1.E-01
8.E-02
6.E-02
4.E-02
2.E-02
0.E+00
分布函数[-]
占空比=0.1
0
50
100
150
200
250
离子能量[eV]

(a)


1.E-01
8.E-02
6.E-02
4.E-02
2.E-02
0.E+00
分布函数[-]
占空比=0.2
0
50
100
150
200
250
300
离子能量[eV]

(b)


1.E-01
8.E-02
6.E-02
4.E-02
2.E-02
0.E+00
分布函数[-]
占空比=0.5
0
50
100
150
200
250
300
离子能量[eV]

(c)

图 16