

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G01R 33/44 (2006.01)

G01V 3/32 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200610108547.9

[43] 公开日 2007年11月21日

[11] 公开号 CN 101074986A

[22] 申请日 1999.12.6

[21] 申请号 200610108547.9

分案原申请号 99124785.X

[30] 优先权

[32] 1998.12.4 [33] US [31] 09/205965

[71] 申请人 施卢默格控股有限公司

地址 英国英属维京群岛

[72] 发明人 P·斯佩尔 K·加尼桑

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
代理人 陈景峻

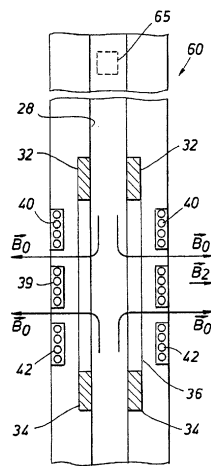
权利要求书2页 说明书18页 附图11页

[54] 发明名称

对在核磁共振区域附近的自旋的预处理

[57] 摘要

公开了一种进行 NMR 测量的方法和装置。在测量过程中 NMR 测量装置、所测量的样本或这两者都可能移动。依据包络线来调制 RF 载波信号的包络线以产生一第一 RF 脉冲序列。在发射第一序列期间可以改变包络线、RF 信号的相位和/或静态磁场以使样本的第一区域基本饱和。发射一第二 RF 脉冲序列以在第一区域内建立一共振区域，并测量样本的特性。



1. 一种用于井孔的 NMR 测量装置的方法, 在该装置和地层构造的样本之间有相对移动, 该方法包括:

- a) 产生一个静态磁场;
- b) 发射第一 RF 脉冲序列;
- c) 在所说的第一序列的发射过程中改变一个参数以使地层构造的样本的第一区域基本饱和; 和
- d) 发射第二 RF 脉冲序列, 以便在第一区域内建立共振区域; 和
- e) 测量样本的特性。

2. 如权利要求 1 所述的方法, 其中所说的参数是一包络线, 并且改变参数的步骤包括改变包络线的步骤。

3. 如权利要求 2 所述的方法, 其中所说的改变包络线的步骤进一步包括改变脉冲幅值的步骤。

4. 如权利要求 2 所述的方法, 其中所说的改变包络线的步骤进一步包括改变脉冲之间的间隔的步骤。

5. 如权利要求 2 所述的方法, 其中所说的改变包络线的步骤进一步包括改变脉冲的持续时间的步骤。

6. 如权利要求 1 所述的方法, 其中所说的参数为 RF 载波信号的相位, 以及改变参数的步骤包括改变所说的相位的步骤。

7. 一种用于井孔的 NMR 测量装置的方法, 在该装置和地层构造的样本之间有相对移动, 该方法包括: :

- a) 产生一个静态磁场;
- b) 发射第一 RF 脉冲序列, 该第一序列包括至少一个再聚焦脉冲, 该脉冲产生来自地层构造的样本的共振区域的至少一个回波;
- c) 在所述序列的发射期间改变所述静态电场至少一次, 以便使比共振区域更大的地层构造的区域饱和; 和
- d) 测量地层构造的样本的特性。

8. 如权利要求 7 所述的方法, 其中改变所说的静态磁场的步骤进一步包括发射至少一个其它脉冲的步骤。

9. 如权利要求 8 所述的方法进一步包括在所说的 RF 脉冲序列没有发射时使所说的发射至少一个其它脉冲同步的步骤。

10. 如权利要求 8 所述的方法进一步包括在发射至少一个 RF 脉冲

过程中使所说的发射至少一个其它脉冲同步的步骤。

11. 如权利要求 1 或 7 所述的方法，其中所说的相对移动是由于 NMR 装置的运动产生的。

12. 如权利要求 1 或 7 所述的方法，其中所说的相对移动是由于样本的移动产生的。

13. 如权利要求 1 或 7 所述的方法进一步包括产生轴向对称的静态磁场的步骤，该轴向对称的静态磁场在共振区域中具有等值线，该等值线在与 NMR 装置的纵轴基本一致的方向上基本是直线。

14. 如权利要求 1 或 7 所述的方法进一步包括在地层构造中钻井孔的同时测量样本的特性的步骤。

对在核磁共振区域附近的自旋的预处理

本发明一般涉及对在核磁共振 (NMR) 区域附近的自旋的预处理。

核磁共振 (NMR) 可以用来测定比如形体组织 (为医学成像的目的) 或地下地层构造 (为井下记录的目的) 的样本的特性。例如, 对于地下地层构造, 可以应用 NMR 来测定并绘制地层构造的孔隙度、地层构造类型、渗透率和油量。

参考附图 1, 作为一个例子, 在边记录边钻井 (LWD) 操作中应用 NMR 来绘制地下地层构造 10 的特性图。这里, 成轴对称的 NMR 测井仪 6 是钻杆柱 5 的一部分, 应用该钻杆柱 5 在地层 10 上钻一井孔 3。例如, 测井仪 6 可以是 Sezginer 等人在美国专利 No. 5, 705, 925 (1998 年 1 月 6 号授权, 题为 “Pulsed Nuclear Magnetism Tool For Formation Evaluation While Drilling Including a Shortened or Truncated CPMG Sequence”) 中或 Miller 在美国专利 No. 5, 280, 243 (1994 年 1 月 18 号授权, 题为 “System For Logging a Well During the Drilling Thereof”) 中所描述的测井仪之一。

同其它大多数井下地层构造测量方法相比, NMR 测量方法具有两个明显的特征。首先, 来自地层的 NMR 信号是来自一较小的共振空间, 比如通常为一薄的共振空间 20a (参见附图 2), 共振空间 20a 的径向厚度与磁场 \bar{B}_1 (未示) 的大小成比例。例如, 取决于不同的共振区域的形状, 该空间可以在一个方向小到 1 毫米 (mm) 而在另一个方向延伸长达几英尺。第二, NMR 测量可以不是瞬时的。如下文进一步描述, 结合这两点事实使 NMR 测井仪易于进行移动测量, 比如 NMR 测井仪 6 围绕井孔 3 的周围移动。

如下文所述, 为了进行 NMR 测量, NMR 测井仪 6 包括建立称为 \bar{B}_0 的静态磁场 (未示) 的永磁体、发射垂直于磁场 \bar{B}_0 的时变磁场 \bar{B}_1 的射频 (RF) 线圈或天线和接收来自与 NMR 测量对应的地层构造的自旋回波的 RF 线圈或天线。并且这两个线圈可以结合在一单个的发射/

接收天线中。

作为一个例子，通过发射 NMR 检测序列以使原子核产生自旋回波，NMR 测井仪 6 测量地层构造 10 的氢原子核的自旋-自旋弛豫时间 T_2 。依次分析自旋回波得到时间 T_2 的分布，从这一分布中可以得到地层构造的特性。例如，附图 4 中所描述的 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 序列 15 就是这样的一种 NMR 检测序列。应用序列 15 可以得到时间 T_2 的分布，并可以应用这一分布来测定并绘制地层构造 10 的特性。

应用 CPMG 序列 15 来测量时间 T_2 的技术包括下面的步骤。在第一步中，NMR 测井仪 6 以合适的时间间隔发射磁场 \bar{B}_1 以应用 90° 激励脉冲 14a 来使氢原子核的自旋（最初与磁场 \bar{B}_0 方向一致）旋转 90° 。虽然没有图示，实际上每个脉冲都是 RF 载波信号的包络线或脉冲串。在自旋从磁场 \bar{B}_0 方向旋转 90° 后，首先自旋立即开始在与磁场 \bar{B}_0 垂直的平面中一致地进动，接着逐渐地失去同步。在第二步中，在 NMR 脉冲 14a 随后的一固定时间 T 中，NMR 测井仪 6 以脉冲的形式施加磁场 \bar{B}_1 并持续一较长时间段（与 NMR 脉冲 14a 比较），以应用 NMR 再聚焦脉冲 14b 来旋转进动的自旋一个附加角度 180° ，同时使其载波相位移动 $\pm 90^\circ$ 。NMR 脉冲 14b 使自旋重新同步，并使自旋在 180° 再聚焦脉冲 14b 后发射一辅助自旋回波（见附图 5），该自旋回波的峰值时间大约等于 T 。以间隔 t_r （大致为 $2 \cdot T$ ）重复步骤 2 “k” 次（这里 “k” 称为回波数，例如，可以假定是从几百到多达几千中的任何一个值）。对于第三步骤，在完成自旋回波序列后，在聚集另一序列自旋回波的下一 CPMG 序列 15 开始之前要求经过一等待周期（通常称为等待时间），以使自旋返回到沿磁场 \bar{B}_0 的平衡状态。观测每个自旋回波序列的衰减并用其来导出 T_2 的分布。

时间 T_2' 是在应用 90° 激励脉冲 14a 后使自旋具有不再一致地进动的特点的时间。这里，在 90° 激励脉冲 14a 结束时，所有的自旋都指向与静态磁场 \bar{B}_0 垂直的一个共同的方向，对于完全均匀的磁场自旋以称为拉莫频率的共振频率进动。拉莫频率可以表述为 $\omega_0 = \gamma \bar{B}_0$ ，这里 γ 为旋磁比，一个核常数。然而，一般地磁场 \bar{B}_0 并不是均匀的，在激励之后，由于静态磁场 \bar{B}_0 的非均匀性使自旋具有在 T_2' 内产生的相移。这种衰减是可逆的，但产生回波的再聚焦脉冲 14a 可

以使这种衰减反相。此外，还产生不可逆的相移（自旋-自旋弛豫），并可通过 T2 时间常数来描述这种相移。这就导致依据 T2 时间常数在 CPMG 序列中的连续回波幅值的衰减。一般地，应用“内检外测型” NMR 测量 $T2 \gg T2^*$ 的自旋。

如上文所述，可以应用 T2 时间的分布来测定地层构造的特性。例如，参考附图 6，地层可能包括容纳有约束流体的小孔和容纳有自由的、可采出的流体的大孔。可以应用分离边界时间 $T2$ （在附图 6 中被称为 $T_{\text{CUT-OFF}}$ ）来将 T2 分布分为两部分：一部分包括比 $T_{\text{CUT-OFF}}$ 小的时间（表示约束流体）和一部分包括比 $T_{\text{CUT-OFF}}$ 大的时间（表示自由的、可采出的流体）。

一般地，通过观测由特定的 CPMG 序列 15 产生的自旋回波 16 的衰减来计算时间 T2。不幸的是，钻杆柱 5（参见附图 1）可能要经过剧烈的横向运动。然而，时间 T2 大致与另一被称为自旋-晶格弛豫时间 T1 的时间常数成比例。时间 T1 具有使自旋沿磁场 \vec{B}_0 方向重新返回到平衡状态的特性，由此，考虑两 T1 和 T2 时间，可以认为每个自旋在 T1 恢复过程中以极紧密的螺旋运动形式朝平衡位置运动回来。幸运的是，时间 T1 和 T2 大致成比例。因此，可以从测量的时间 T1 导出时间 T2 的分布。事实上，建立约束流体截止点的最初的工作是应用 T1 来完成的。然后根据 T2 将这些结果表述出来并应用在商业上。参见 W.E. Kenyon, J.J. Howard, A. Sezginer, C. Straley, A. Matteson, K. Horkowitz, and R. Ehrlich, 等人的 Pore-Size Distribution and NMR in Microporous Cherty Sandstones, 论文 LL（在第 30 届年度记录研讨会（the 30th Annual Logging Symposium）上提交的论文，SWPLA, 1989 年 6 月 11-14 日）。

基于极化的测量可以应用反向恢复序列（inversion recovery sequence）或饱和恢复序列（saturation recovery sequence）。在饱和恢复序列情况下，例如应用几个将磁化强度减少为零的 90° 脉冲使自旋系统饱和。然后在应用监测脉冲或脉冲序列（比如 CPMG 序列）之前使自旋系统恢复达一可变长度的时间。反向恢复技术要求在原子核本身的自旋已经与静态磁场成一线之后应用 180° 脉冲使自旋反向。随着时间的过去，自旋按照 T1 朝平衡方向衰减，但由于 180° 脉冲在检测器中并不产生信号，并没有进行测量。然而，在衰

减完成之前，监测脉冲或脉冲序列（比如 CPMG 序列）中断了衰减，该监测脉冲或脉冲序列将自旋旋转到测量平面（即，在检测器中产生信号）。有意义的信息就是在最初的 90° “读出”脉冲瞬间之后的信号幅值。这种幅值完全依赖于在初始的 180° 脉冲和 90° 脉冲之间的恢复时间。接下来测定幅值，允许自旋系统完全驰豫到平衡状态，然后重复脉冲序列。

作为反向恢复序列在井下应用的例子描述在 Kleinberg 等人的美国专利 No. 5, 023, 551（题为“Nuclear Magnetic Resonance Pulse Sequences For Use With Borehole Logging Tools”，1991 年 6 月 11 日授权）中。然而描述在美国专利'551 中的反向恢复序列并不能应用绝热脉冲，由此导致仅在一个狭窄的区域中勘测。此外，在存在移动和“内检外测”的情况下，使一个区域饱和比使其完全反相恢复更容易。因此，比较可取的做法是使区域饱和。

回过来参考附图 2，一般地，应用基于极化的测量而不应用上文所描述的基于衰减的测量来测量时间 T_1 。在基于极化的测量中，每个基于极化的测量首先包括应用饱和序列来使在共振区域（比如，在附图 2 中所描述的圆柱形共振空间 20a）中的自旋到达饱和的步骤。接着，经过一极化时间将共振空间 20a 极化到静态磁场 \bar{B}_0 。随后，应用检测序列（比如 CPMG 序列）以产生来自地层构造 10 的自旋回波。然后，分析开始的少数几个自旋回波的幅值以确定孔隙度分布 Φ (T_1) 的极化加权整数 $\Phi(t_{wait})$ 。因为，只需观测开始的少数几个回波就可以确定信号的幅值，故可以在比基于衰减测量 T_2 所需的时间更短的持续时间内测量 T_1 ，因而，测量 T_1 时更不适合于移动 NMR 测井仪 6。以不同的等待时间连续地重复（在适当的饱和序列之后）检测序列几次以得到孔隙度分布 $\Phi(T_1)$ 。

作为一个例子，应用基于极化的测量来测量在位于饱和空间 20b 中的共振空间 20a（参见附图 2）中的氢原子核的时间 T_1 。在这里，NMR 测井仪 6 首先使在饱和空间 20b 中的自旋饱和。然而，极化时间应该足够长以允许 NMR 测井仪 6 能够在井孔内作充分的移动。在这种情况下，NMR 测井仪 6 的移动使共振空间 20a 移动，以使 NMR 测井仪 6 接收来自移动了的共振空间 20a'（参见附图 3）中的自旋回波，该共振空间 20a' 部分落到最初的饱和空间 20b 之外。结果，移动了的

共振空间 20a' 包括一没有饱和自旋的区域（一般称为“移入新自旋”效应）和一带有饱和自旋的最初的饱和空间 20b 的部分区域。不幸的是，基于极化的 NMR 技术不允许在极化时间中移入“新自旋”，因为新自旋可能引入测量误差。例如，测量可能错误地指示在地层构造中有比实际出现的更多的约束流体量。

在申请号为 PCT/US97/23975 的 PCT 申请（题为“Method For Formation Evaluation While Drilling”，1997 年 12 月 29 日申请）中描述了一种使更大区域饱和的一种方法。这一申请指出，在测量开始时，发射覆盖一个相对较大频率范围和/或特别宽的带宽的一个或多个射频脉冲或应用具有能够使 NMR 测井仪周围的圆柱形空间饱和的扫描频率的一个或多个脉冲。该申请进一步描述了当由于测井仪移动超出饱和区域引起测量无效时应用加速度峰值来测量。该申请还进一步描述在测井仪上装备支座以阻止测井仪移动超出饱和区域。

因此，人们一直渴望将在 NMR 测量装置和所勘测的样本之间的相对移动引起的误差最小化。

本发明公开了一种供在装置和样本之间有相对移动的 NMR 测量装置使用的方法。装置、样本或这两者都可能移动。在本发明一个实施例中，该方法包括发射第一 RF 脉冲序列。第一序列具有包络线。在发射第一序列期间改变包络线，以便样本的第一区域基本饱和。发射第二 RF 脉冲序列以在第一区域内建立共振区域，并测量样本的属性。

在另一实施例中，供在装置和样本之间有相对移动的 NMR 测量装置使用的方法包括应用 RF 载波信号来发射第一 RF 脉冲序列。该载波信号具有一相位。在发射第一序列期间改变包络线，以便样本的第一区域基本饱和。发射第二 RF 脉冲序列以在第一区域内建立共振区域，并测量样本的属性。

在另一实施例中，在装置和样本之间有相对移动的 NMR 测量装置包括至少一个建立静态磁场的磁体、一第一线圈、一第二线圈和一脉冲发生器。脉冲发生器与第一线圈和第二线圈连接，并使其适合于应用第一线圈发射第一 RF 脉冲序列以产生一时变磁场。第一序列包括至少一再聚焦脉冲以产生至少一个来自样本的共振区域的回波。脉

冲发生器还适合于在发射第一序列期间内应用第二线圈来至少短暂地改变静态磁场一次以使一区域饱和度比共振区域更大。

在进一步的实施例中，一种供在装置和样本之间有相对移动的 NMR 测量装置使用的方法包括应用反向恢复序列，该反向恢复序列该包括至少一个或多个绝热脉冲。

通过下面的详细描述、附图和权利要求本发明的其它实施例将变得更清楚。

附图 1 为地下井的示意图。

附图 2 为沿着附图 1 中的 2-2 线的井的横截面图。

附图 3 为在 NMR 测井仪移动后的井的另一横截面图。

附图 4 和 5 为 CPMG 脉冲序列的波形。

附图 6 为驰豫时间 T2 的分布示例。

附图 7 为依据本发明的一个实施例的基于极化测量流程图。

附图 8、9 和 10 为依据本发明的不同的实施例的 NMR 测井仪的示意图。

附图 11 为沿着附图 10 中的 11-11 线的 NMR 测井仪的横截面图。

附图 12 为 NMR 脉冲序列的波形。

附图 13、16、18 和 20 所示为共振区域饱和的等值线图。

附图 14、15、17 和 19 和 21 所示为从 NMR 测井仪的周围的饱和区域接收来的对比信号幅值图。

附图 22 和 23 所示为应用有和没有交错自由发展时间的不同数目的脉冲时的共振区域饱和的等值线。

附图 24 和 25 所示为应用有和没有交错自由发展时间的不同数目的脉冲时的共振区域饱和的等值线。

参考附图 7，易于移动的 NMR 测量装置（例如 NMR 测井仪）可以应用依据本发明实现基于极化的 T1 测量的方法实例 50。因为所测量的样本可能会移动，当样本、测量装置或两者都有移动时，可以应用这一测量方法。方法 50 包括使样本中的一个区域中的自旋饱和的步骤（块 52），该样本是将要测量其特性的样本；接着，经过预定的时间间隔（块 54），以使至少在该区域中的自旋发生部分极化；随后，方法 50 包括应用（块 56）检测序列的步骤（例如，基于 CPMG 的序列）以产生来自样本的共振区域的自旋回波。如下文进一步描

述, 当 NMR 测量装置移动了时, 应用一些技术来使饱和区域的边界和饱和密度最大以使共振区域基本保持在饱和区域内。应用这些的技术可以减少测量误差, 并且 (例如) 如果应用在较小梯度的几何结构中时, 不需要对 NMR 测量装置进行稳定的稳定装置。

例如, 如下文进一步更详细地描述, 测量方法 50 可以用于绘制地下地层构造的特性, 并且也可以应用到其它的在样本和 NMR 测量装置之间产生相对移动的应用中 (比如, 其它的“内检外测型”的 NMR 应用)。在一些实施例中, NMR 测量装置可能包括电磁场产生元件 (比如, 一个线圈、一个电磁铁和一个永磁体) 以产生至少两个磁场: 一个称为 \bar{B}_0 的磁场 (未示) 和一与磁场 \bar{B}_0 基本垂直的称为 \bar{B}_1 的磁场 (未示)。参考附图 8, 例如, 在一些实施例中, NMR 测量装置可能是一 NMR 边钻井边记录 (LWD) 的测井仪 60, 例如, 该测井仪 60 包括建立磁场 \bar{B}_0 的环行永磁体 32 和 34 和建立时变磁场 \bar{B}_1 的线圈 39。在一些实施例中, 磁场 \bar{B}_1 可能 (当施加脉冲时) 具有称为 $\bar{\omega}_0$ 的射频 (RF) 载波分量。

磁场 \bar{B}_1 的载波频率一般以 ω_0 表示。发射磁场 \bar{B}_1 产生一具有一定径向厚度的共振区域, 依据频率, 该径向厚度是由在激励区域中的 ω_0 和 ω_1 的梯度决定的, 这里 $\bar{\omega}_1$ 为 $\gamma \bar{B}_1$ 在磁场 \bar{B}_0 上的投影。在一些实施例中, 如下文所述, 磁场 \bar{B}_0 还可能 (至少部分地) 由梯度线圈 40 和 42 产生, 以使磁场 \bar{B}_0 具有一个随着低频变化的分量。NMR 测井仪 60 还可能包括处理电路, 该处理电路包括比如连接到线圈 (例如, 线圈 39、40 和 42) 的脉冲发生器 65, 并适合于以下文将要描述的方式发射磁场 \bar{B}_0 和/或磁场 \bar{B}_1 。

大体上, 每个基于极化的 NMR 测量都包括三个标准块 52、54 和 56 (参见附图 7), 以及可采用一次或多次测量来获得每个 T1 值。然而, 可以应用检测序列 (即, 块 52) 来实现饱和 (即, 执行块 56 的功能), 因此, 如果满足了两个条件: 连续地重复测量 (称为“成堆的 (stacked)”试验) 和信号检测序列 68 能够完全消除为进行下一步测量的磁化, 就可以取消块 52。如果应用这一技术, 则放弃来自第一次测量中的结果, 因为第一次测量是以一不正确的极化时间来执行的。作为一种变型, 仅在应用检测序列之前, 通过在共振区域中应用绝热快速变迁 (passage) 脉冲来绝热地进行激励。

三个基本块 52、54 和 56 还可能还有其他变型。作为另外一个例子，顺序块 54——块 56——块 52 可以用来执行每次测量，这种变型从编程角度来看是较优的。当应用第二种变型时，放弃第一次测量。只要实现了块 52、54 和 56 的功能方法 50 的其他变型都属可能。

不管是通过显式的饱和序列或还是通过检测序列进行饱和，饱和的目的都是通过射频 (RF) 发射使一个较大的区域或空间饱和。如下文更详细的描述和模拟实验表明，根据特定的实施例，可以选择如下方式实现饱和：应用 RF 脉冲序列（比如 CPMG 检测序列），该序列是适合于应用 NMR 测井仪 60 的移动来达到所需的饱和状态；不管 NMR 测井仪 60 有还是没有移动都缓慢改变序列的时间特性；不管 NMR 测井仪 60 有还是没有移动都随机地改变序列的特性；或者结合应用这些技术。

一种具有恒定参数的单一 CPMG 序列在自旋分布区域中产生强烈的饱和区域，该区域称为“孔穴” (holes)。由于孔穴都彼此完全分开，虽然实现了深远的孔穴加热，但其仅导致弱的饱和。此外，一旦破坏了在孔穴的位置处的磁化，继续施加序列不可能进一步增强饱和。如下文进一步描述，通过对分布在饱和空间中的这些孔穴进行脉冲“扫描”移动 NMR 测井仪 60 可以增强饱和密度。

可以修改 CPMG 检测序列，以将再聚焦脉冲数量增加到测量最初的回波串幅值所必须的典型的再聚焦脉冲数目（例如 10）之上。如果在极化时间内的 NMR 测井仪 60 的移动总是与在检测序列过程中的 NMR 测井仪 60 的移动相联系，则这种方法效果很好。然而，不幸的是，如果 NMR 测井仪 60 在检测序列过程中是静止的而在极化时间内是运动的，则产生的饱和不令人满意。通过模拟（下文讨论）表明，如下文进一步描述，即使在测井仪没有移动的情况下，也可以通过缓慢改变序列随时间的特性以扩展饱和区域来避免这个问题。在本文中，例如术语“序列的特性”一般地指序列的包络线或 RF 载波频率的相位。作为改变包络线的可能的方法的例子，包络线可能包括脉冲 120（参见附图 12），每个脉冲具有一定的持续时间（称为 t_p ），并且脉冲 120 由称为 t_r 的时间间隔分隔开（从脉冲的中心到脉冲的中心）。这样，如下文进一步描述，可以改变持续时间 t_p 和/或时间间隔 t_r 。（作为举例）以扩展饱和区域。

如下文进一步描述，不仅可以缓慢改变检测序列的特性（即，用于实现饱和目的的序列），而且还可以以无关联的或随机的方式从一个脉冲到另一个脉冲改变检测序列的特性。随机极限值（实现完全随机）是发射不相干噪声。由于序列的相干的、非随机特性占主导作用，特性中的随机变化与缓慢变化形成对比，在特性的缓慢变化序列中饱和效果深远。结果，缓慢变化特性可能导致由连续脉冲递增地加热极度失谐孔穴。在很短的时间间隔内产生的饱和点彼此完全分离。然而，随机变化特性使序列的相邻脉冲对同一孔穴没有贡献，在很短的时间间隔中产生的饱和能够更均匀地被传播开。因此，随机变化的脉冲通常形成更一致的饱和密度。如下文所述（和通过模拟说明），可以结合使用这两种技术以增强序列的性能。如下文进一步描述，如果出现的移动足够快，以致使能够在几个脉冲周期内扫描在将相邻的孔穴分开的距离上的孔穴，则序列的相干成分完全被破坏了，具有缓慢变化特性的序列可以与具有随机变化特性的序列类似地执行。

如下文所述，如果结合其它的变化（例如，载波频率相位的变化），在 CPMG 序列中的再聚焦脉冲的翻转角度（flip angles）不需要大到足以产生失谐饱和。因此，通过缩短 RF 脉冲，可以降低饱和所需的能量。对于足够短的脉冲，加热孔穴的影响可以忽略。由于这种情况，可以压缩在脉冲之间的自由发展时间（free evolution period），这样就可以在短得多的时间内实现饱和。在很短的脉冲极限内，这种技术引起发射不相干噪声（可以设计其结构以符合需要）。实际上，有限的脉冲上升和下落时间设定了脉冲持续时间的下限。如下文所述，在实现饱和所需的能量和时间与饱和带宽之间有一种折衷方案。

应用 CPMG 序列实现饱和

下面，详细讨论应用有和没有缓慢移动引起的 ω_0 的改变的 CPMG 序列实现饱和的例子。虽然在本说明书中作为例子特别指 CPMG 序列，但上文所述的加热孔穴可以通过各种多相脉冲序列来实现，该多相脉冲序列具有大量重复脉冲标准块的特点。

在 CPMG 序列过程中所重复的相干脉冲激励所选择的 $\Delta \omega \gg \omega_1$ 的自旋，这里 ω_1 大致等于共振区域的径向厚度，并且 $\Delta \omega$ （频率空间中的距离）由下式具体定义：

$\Delta \omega = \gamma \bar{B}_0 - \omega_{rf}$, 这里 ω_{rf} 是用于第一 CPMG 序列的磁场 \bar{B}_0 的 RF 频率。

随着 $\Delta \omega$ 增加激励步幅变得越来越小, 但激励从一个脉冲到一个脉冲都总和起来, 在孔穴中激励幅值达到极其大的值。因为横向磁化与 T2 一致地衰减, 所选择的自旋变得“饱和”。通过序列的周期确定这些孔穴的间隔 (称为 $\Delta \omega_h$)。不可忽视的脉冲持续和失谐效应产生某些偏差, 因此, 孔穴的间隔 $\Delta \omega_h$ 大致由下式描述: $\Delta \omega_h = \frac{2\pi}{t_c}$,

这里 t_c 是一个再聚焦脉冲的开始到下一个再聚焦脉冲的开始之间的回波间隔。

结合驰豫, 单一 CPMG 序列技术引起以一定的失谐频率加热孔穴。在被加热的孔穴之间是不可能测量的, 因为测量区域的宽度 $\Delta \omega$ 延伸达 $\Delta \omega_s \approx 2 \Delta \omega_h$ 以上, 其对于持续时间为 t_p 的 180° 再聚焦脉冲变为 $\Delta \omega_s \approx \frac{2\pi}{t_p}$ 。因为, t_c 总是比 t_p 大, $\Delta \omega_s > \Delta \omega_h$, 所以可能有几个孔穴被加热变成共振区域。为计算信号损失程度, 磁场的几何结构、驰豫时间和检测带宽都必须加以考虑。

为说明孔穴的分布, 附图 13 所示为二维等值线 (contour plot) 80 (从模拟实验中得出的), 它是所计算的孔穴分布的等值线, 该孔穴被加热成在水平轴上线性变化 ω_0 和在垂直轴上线性变化 t_p 的 $M_z=1$ 的纵向磁化。白色区域表示完整地保持磁化, 而黑色区域表示对 100% 饱和的偏离或反相磁化。在 $\Delta \omega=0$ 处应用第一 CPMG 序列, 所示为在紧接着这种 CPMG 序列的结尾处对失谐磁化 M_z 的影响。CPMG 脉冲序列的参数为 $t_c=500 \mu s$, $t_{p,180}=125 \mu s$, $k=1000$, 这里 k 为再聚焦脉冲数。选择驰豫时间较长, 但仅是回波串的持续时间的一小部分。在这种模拟实验中, 应用完全矩形脉冲。然而, 本发明的实施例可以应用基本为矩形的脉冲, 并且也可以应用基本是非矩形的脉冲。在附图 13 中, 没有对第一激励脉冲的效果进行仿真 (模拟)。

附图 14 表明对于几个驰豫时间, 在移动横坐标 $\Delta \omega$ 的频率下第

二次测量可以得到模拟合成的对比信号幅值 82 (即 M_z/M_0)，并且当平均 $\Delta \omega = \pm 0.75 \omega$ 时，在 $\omega_1 \cdot t_p = \pi$ 的第一次测量 (如前文所述) 中饱和减少该幅值。这就意味着在测量之间载波频率 ω_0 已经被移动了 $\Delta \omega$ 。每个对比信号幅值 82 对应于不同的时间 T1 (例如，等于 $2 \cdot T2$)。第二次测量的参数与第一次测量的参数相同，并且选择脉冲的翻转角度为 180° 。在附图中 (以及在模拟实验中)，假设 $\frac{d\omega_1}{d\omega_0} = 0$ ，即，在

共振区域附近磁场 \bar{B}_1 的变化可以忽略。对于轴对称的梯度几何结构，横坐标 ($\Delta \omega / \omega_1$) 与在第一和第二次测量之间的在 (共振区域的) 径向上的差值成比例。当半径的差值比半径小得多时，上述假设 ω_1 为常数是一种有效的近似，一种证明了在图中选择的恒定的翻转角度是正确的事实。

正如从附图 14 所看到的，饱和区域延伸基本不超过 $2 \cdot \frac{\Delta \omega}{\omega_1}$ ，即两倍共振区域的厚度。因此，如果共振区域的径向移动小于 $1 \cdot \frac{\Delta \omega}{\omega_1}$ ，则下一测量步骤只是在完全饱和时开始。附图 15 所示的每个对比信号振幅 84 都与在第一序列中大量的再聚焦脉相联系。我们可以看到，在较小的 $\Delta \omega$ 处的大部分饱和都发生在开始的 10 个回波内了。在这里以及在下面的例子中，选择 $T1 = 2 \cdot T2 = 100$ 毫秒 (msec)。

在第一 CPMG 序列期间测井仪移动可能导致在附近共振区域中增加损失。例如，附图 16 所示为在第一序列过程中测井仪的移动速率为 $-20 \omega_1/s$ 的失谐磁化 M_z 产生的等值线 86。横轴表示失谐频率 $\Delta \omega_1$ 与第一 CPMG 序列的 (脉冲振幅) ω_1 的比率。等值线描述了在第一 CPMG 序列后剩下的相对纵向磁化。假设脉冲幅值恒定。脉冲参数和驰豫时间与上文的相同。纵轴表示有多少个再聚焦脉冲应用到具有载波 ω_{RF} 的第一 CPMG 序列上，该数目大致与这种序列的持续时

间成比例。再聚焦脉冲数具有从图顶部的一个再聚焦脉冲（即，一个块跨越大约 $500 \mu\text{s}$ ）到图底部的 100 再聚焦脉冲（即，一个块跨越大约 50ms ）的范围。在这个例子中，在 50ms 内，NMR 测井仪 60 移动距离为 $+1 \omega_1$ （其大致为半个外形宽度）。开始时，载波 ω_{RF} 与 $\Delta \omega = 0$ 对应，最后，载波 ω_{RF} 与 $\Delta \omega = +1 \cdot \omega_1$ 对应。如图所示，随着回波数的增加，移动 NMR 测井仪 60 将“扫描”在自旋分布区域上的孔穴，并由此增加了饱和密度。

附图 17 所示为当在整个外形（为模拟的目的采用矩形）宽度为 $\pm 0.75 \omega_1$ 上进行平均时所得的对比信号幅值（即， M_z/M_∞ ）。从顶部到底部，幅值 88 代表 $k=1, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81, 91$ 的结果。需注意的是，如附图 14 和 17 所示，随着回波数的增加损失加大，并且对于超过 10 个以上的回波，变得比在 NMR 测井仪 60 没有移动时的饱和效果强烈得多。现在饱和区域具有超过 $5 \cdot \omega_1$ 的宽度。在与自旋的驰豫时间可比拟的一段时间内损失增加，并且这种损失对于小的 $\Delta \omega$ 甚至能够引起负信号。精确的分布取决于自旋集合体的驰豫时间和移动。对于越小的驰豫时间分布变得越窄。

前文假设在 CPMG 序列中的脉冲都是完全的矩形脉冲。然而，并不能达到这种理想的真正的“矩形”脉冲，而是存在有限的上升和下落时间。这就限制了包含在脉冲中的频谱宽度。在极度失谐状态中，被加热孔穴的宽度和加热它们的速率与在孔穴的位置处的脉冲的频率分量的幅值成比例。因此，在一些实施例中，极度失谐加热孔穴比在上述模拟中的更不显著。

对于在本申请中所讨论的脉冲，具有较宽的频率分布比较有利。因此，在一些实施例中，具有可能的最短上升和衰减时间常数的矩形脉冲比较可取。此外，通过变化脉冲包络线的形状以适合于脉冲的频率内容可以将饱和区域最优化。

一般地，在没有移动时，通过辐射具有变化参数和带宽脉冲的重复多脉冲序列可以产生深度的饱和。如果在应用该序列的同时缓慢改变脉冲序列参数，被加热孔穴的位置可以缓慢移过自旋分布区域，并增强饱和。被改变的脉冲序列参数包括：

- 脉冲间隔 t_r 的变化，
- t_p 的变化，

- 比如通过脉冲幅值、磁场方向和载波频率 ω_{RF} 对 $\bar{\omega}_1$ 的改变,
- $\bar{\omega}_0$ 的变化, 和
- 脉冲相位的变化。

这些参数的综合变化和其它参数的变化都是可能的。可以通过使磁场 \bar{B}_0 和 \bar{B}_1 的实际变化 (比如, 变化磁铁和天线间隔或取向和/或射频功率) 或样本和 NMR 测井仪 60 之间的相对移动来改变 $\bar{\omega}_0$ 和 $\bar{\omega}_1$ 。在这种方式中, 样本相对于 NMR 测井仪 60 之间的相对移动可以来自于样本的移动 (比如流体流动或扩散) 或来自于测井仪的移动。

改变 $\bar{\omega}_0$ 的另一个方法是借助于电磁铁或梯度线圈来改变静态磁场。例如, 反过来参考附图 8, 在一些实施例中, NMR 测井仪 60 可能包括永磁体上部永磁体 32 和下部永磁体 34, 该永磁体 32 和 34 在 NMR 测井仪 60 的套筒 28 周围, 并产生一径向、轴向对称的磁场 \bar{B}_0 。在平行于 NMR 测井仪 35 的纵轴线的方向将磁体 32 和 34 极化以使其相互配合提供一低的梯度磁场 \bar{B}_0 。例如, 磁体 32 和 34 的北极可能彼此相对以提供一磁场 \bar{B}_0 , 该磁场 \bar{B}_0 的磁力线从 NMR 测井仪 60 的纵轴径向地延伸出来。在一些实施例中, 磁力可穿透的件 36 围在套筒 28 的周围, 并且位于上部磁体 32 和下部磁体 34 之间。这样排列的结果是磁力可穿透件 36 使磁场 \bar{B}_0 聚集以使磁场 \bar{B}_0 的梯度最小, 因而, 在我们所关心的区域中产生一更均匀的磁场 \bar{B}_0 。NMR 测井仪 60 可能包括或可能不包括套筒 36。在第 09,033,965 号美国专利申请 (题为 “Nuclear Magnetic Resonance Apparatus and Method For Generating an Axisymmetric Magnetic Field Having Straight Contour Lines in the Resonance Region”, 1998 年 3 月 3 日申请) 和美国专利 US4,350,955 (题为 “Magnetic Resonance Apparatus”, 1982 年 12 月 21 日授权) 中都可以找到对这些装置的更详细的描述, 这两份专利 (专利申请) 在这里都以引用的方式结合在本申请中。

为改变磁场 \bar{B}_0 , NMR 测井仪 35 包括梯度线圈, 比如线圈 40 和 42, 该线圈也围绕在套筒 28 的周围。对线圈 40 和 42 施加脉冲形式的 DC 电流 (通过脉冲发生器, 比如脉冲发生器 65) 以在磁场 \bar{B}_0 中产生一附加磁场分量 \bar{B}_2 。如果在线圈 40 和 42 中的电流流动方向相反, 则 \bar{B}_2 基本为径向。可以将线圈 40 和 42 设置在磁体 32 和 34 之间以便使两线圈 40 和 42 都给磁场 \bar{B}_0 提供一正的磁场分量, 该磁场分量与在关

注的区域中的磁场 \bar{B}_0 的方向可能基本一致或可能不一致，这取决于不同的实施例。在一些实施例中，线圈 40 和 42 可以由一对单匝或多匝的电流回路构成，该回路中的电流大小相等，循环方向相反。例如，该线圈 40 和 42 可以由鞍形线圈构成。

结合径向、轴向对称的磁场 \bar{B}_0 的设计方案应用线圈 40 和 42 的其它实施例都是可能的。例如，参考附图 9，在另一 NMR 测井仪 61 中，用一环行永磁体 62 替换永磁体 32 和 34，该永磁体 62 围绕在套筒 36 的周围，并且位于线圈 40 和 42 之间。磁体 62 产生磁场 \bar{B}_0 ，其磁力线与测井仪 61 的轴线平行、轴向地延伸。为使磁场 \bar{B}_1 基本上与磁场 \bar{B}_0 平行，在线圈 40 和 42 中的电流必须以相同的方向流动。作为一个例子，磁体 62 的顶部形成磁体 62 的北极，磁体 62 的底部形成磁体 62 的南极。

除了如上文所述的径向、轴向对称的 \bar{B}_0 的设计方案外的其它结构也是可能的。例如，梯度线圈可以应用具有两维 (2-D) 双极性 \bar{B}_0 的设计方案。2-D 双极性 \bar{B}_0 的设计方案的例子在美国专利 No. US5, 280, 243 (题为 "System For Logging a Well During the Drilling Thereof" 1994 年 1 月 18 日授予 Melvin Miller 专利权) 中可以找到。按照这种方式，应用 2-D 双极性 \bar{B}_0 设计的 NMR 测井仪 68 包括一环行磁铁 72，该磁铁建立一如附图 10 和 11 中所示的双极性模式的磁场 \bar{B}_0 。与其在 NMR 测井仪 60 和 61 中的对应的部件不同的是，RF 线圈 73 和 74 不与 NMR 测井仪 68 的纵轴同轴，而是，排列 RF 线圈 73 和 74 以在磁场 \bar{B}_1 中产生双极性模式，这样就使在共振区域中磁场 \bar{B}_1 的等值线基本垂直于磁场 \bar{B}_0 的等值线。测井仪 68 包括梯度线圈 76 和 77，每个线圈都包括一个或多个矩形环以产生梯度磁场，该梯度磁场与在关注区域中的由磁铁 72 所建立的磁场 \bar{B}_0 的方向一致。

这样，由于前文所描述的结构，自旋以大约 $\bar{\omega}_0 + \bar{\omega}_0^{\text{gradient}}$ 的频率进动。如果两个矢量平行则产生最大的效应。因而，这种技术的结果就是改变了 $\Delta \omega$ 而不改变 ω_{rf} 。这对于改变 ω_{rf} 有利，因为具有高的品质因数的天线的带宽限制了 ω_{rf} 变化的范围 (不需重新调整天线，这至少在饱和序列过程中如果应用机械开关通过转换电容器来调整是不切实际的)。在一些实施例中，如果它必须以在整个饱和序列中的不同幅值来激励，则这种方法的缺点是需要相对较大的能量来

驱动电磁铁（与在成像设备中的应用相比较）。有以下几种方式应用梯度线圈（或多个线圈）：

- 在（磁场 \bar{B}_1 的）一个脉冲周期内在梯度线圈中产生基本恒定的电流以有效地改变这个脉冲的共振区域的半径。

- 在（磁场 \bar{B}_1 的）一个脉冲周期内改变在梯度线圈中的电流以产生一“扫描”（sweep）脉冲而不改变 rf 脉冲的频率。依据实际的参数，扫描脉冲可以使特定的区域反相、激励特定的区域或使特定的区域饱和。可以在反相恢复序列中应用这种技术（而不是在饱和序列中）以使 NMR 测井仪周围较大的区域反相恢复。

- 在（磁场 \bar{B}_1 的）脉冲之间激励梯度线圈以破坏可能保留的横向磁化。如果梯度脉冲持续时间（称为 t_{grad} ）足够短，那么在整个饱和区域上的 $\alpha = \vec{\omega}_0^{\text{gradient}} t_{\text{grad}}$ 的变化可以忽略，这类似于随机地改变磁场 \bar{B}_1 的脉冲的相位。

- 在与施加磁场 \bar{B}_1 的每个脉冲的同时在梯度线圈中施加脉冲形式的电流。

- 可以应用梯度线圈来产生如上文所述的随机或连续变化。

梯度线圈的其它应用都是可能的。

随机变化的 CPMG 序列

CPMG 序列的脉冲串的特性也可以随机地改变。例如，可以随机地改变 RF 载波脉冲的相位以随机地产生比如 0° 、 90° 、 180° 和 270° 脉冲相位（至少在典型的核磁共振（NMR）波谱仪中可以产生这几种相位）。参见附图 18（所示为不同的回波数的对比信号损失的等值线 90）和附图 19（所示为当在 $\pm 0.75 \omega_1$ 的空间厚度上进行平均时不同的回波数的对比信号损失的等值线 92），在所示的实例中的脉冲是随机地产生的，并且测井仪 60 和 35 不移动。除了这种时脉冲相位的随机化外，所有的自旋和脉冲参数都与上文所述的实施例相同。

我们可以看到，在自旋分布区域中饱和加热出了许多较宽的、完全分离的条纹区。被饱和区域的宽度比由受移动影响的 CPMG 序列产生的区域的宽度小，但饱和分布图比由 CPMG 序列产生的分布图平坦得多。这表示在共振区域的范围（应用相干特性）和可靠量的饱和分布（应用随机特性）之间的一种折衷方案。必须注意的是，对于

$T_{1,2}$ (这里 100ms) $\ll t_0$ (这里 50ms) 的自旋 (这里 t_0 是 CPMG 序列持续时间), CPMG 序列产生的分布具有更光滑的形状。在应用随机相位序列过程中产生移动能够稍稍增加其性能, 但分布仍然保持光滑。

因为不是每个孔穴都是以相同的“速度”被加热, 所以产生不完全饱和的条纹区。如我们所见, 取决于不同的位置 $\Delta\omega$, 甚至某些孔穴被完全抑制, 作为一个例子, 在附图 20 中每第四个孔穴就看不见。这些未完全饱和的点的位置取决于再聚焦脉冲的持续时间: 失谐, 一持续时间为 t_p 的脉冲使自旋围绕指向 $\bar{\omega}_1 + \bar{\Delta\omega}$ 方向的“有效转动轴”转动 $\alpha(\Delta\omega) = \sqrt{\omega_1^2 + \omega^2} t_p$ 的角度。在 α 等于 2π 的倍数的地方出现未饱和点。因此, 通过改变 $\omega_1 \cdot t_p$, 可以使这些点饱和。

在附图 20 (所示为对于不同的回波数的对比信号损失的等值线 94) 和附图 21 (所示为当在 $\pm 0.75\omega_1$ 的径向空间积厚度上进行平均时不同的回波数的对比信号损失的等值线 96) 中图解了缓慢增加脉冲长度 (在附图 12 中以“ t_p ”表示) 的实例的这种效果。在这个模拟实验中, 脉冲长度从在第一次再聚焦脉冲中的 $125\mu\text{s}$ (180° 脉冲) 线性地增加到在第 100 次再聚焦脉冲中的 $250\mu\text{s}$ (360° 脉冲), 而同时 t_{free} (脉冲之间的距离, 如在附图 12 中所描述的) 保持不变。所有的其它参数与在前面的例子中都相同。所得的饱和分布比没有改变脉冲长度所得的分布更光滑并且稍稍宽些。

再次, 一般地, 对于特定移动范围可以通过改变序列的各种参数以使脉冲序列的饱和效果最优化, 比如改变 t_0 (t_0 大约与被加热孔穴的间隔成反比例)、 t_p 和脉冲相位等, 以及在相干特性和随机特性之间的折衷方案。

前面的饱和序列的例子应用极度失谐孔穴加热效应来产生饱和。如上文所述, 持续时间为 t_p 的脉冲总是使失谐的自旋转动比正常的翻转角度 $\alpha(0)$ 大的角度 $\alpha(\Delta\omega)$ 。因而, 对于具有 $\alpha(0) = 180^\circ$ 的再聚焦脉冲 (即, 180° 脉冲), 对于失谐它总是保持 $\alpha(\Delta\omega) > 180^\circ$ 。另一方面, 如果 $\alpha(\Delta\omega) = (2n+1) \cdot 180^\circ$ 则发生最佳的激励, 并且由此产生最佳激励失谐。然后, 自旋转离纵轴的有效翻转角度为 $\theta = \theta_{\text{max}}$, 此时对于一给定的 $\Delta\omega$ 最大的有效翻转角度为 $\theta_{\text{max}} = \alpha(\Delta\omega) 2\arctan\left(\frac{\omega_1}{\Delta\omega}\right)$ 。因而, 应用 180° 脉冲来产生失谐

饱和可能浪费能量。

附图 22 和 23 说明了饱和分布（在整个共振空间厚度上进行平均）与应用在序列中的再聚焦脉冲的 $\alpha(0)$ 的关系。如前文所述随机地改变相位。在附图 22 中，所示为自由发展时间 t_{free} （即，在如附图 12 中所示的在再聚焦脉冲之间的时间间隔）被设定为 $375 \mu s$ 的对比信号损失图 98，在附图 23 中，所示为 t_{free} 设定为 0 的对比信号损失图 100。在两附图 22 和 23 中所示都是 $\Delta \omega$ 函数的翻转角度为 9° 、 20° 、 30° 、 45° 、 90° 和 180° 的脉冲从 1 到 100 个的信号损失 98 和 100。通过改变脉冲持续时间 t_p 来产生不同的翻转角度。如我们所见，对于不同的时间 t_{free} 信号损失分布几乎相同，因而，在随机相位变化的情况下，饱和模式主要由脉冲持续时间决定，而不是由自由发展持续时间决定。

对于一给定的硬件能够应用的最小脉冲持续时间由脉冲的上升时间常数（称为 t_r ）决定。如果 $t_p < 3t_r$ ，则在其截止之前脉冲没有达到最大值 ω_1 ，当 t_p 进一步减小时，它很快变得几乎无效。对于钻井记录 NMR 装置一个较好的估计是 $t_r = 5 \dots 30 \mu s$ 。

当 t_p 减少时，饱和区域变得更宽。实际上关注的区域主要是符合

$$|\Delta \omega| < \sqrt{\left(\frac{2\pi}{t_p}\right)^2 - \omega_1^2} \text{ 的区域, 即, 在两个内部未饱和点内的 } \alpha(\Delta \omega) < 2\pi \text{ 的}$$

区域。随着 $\Delta \omega$ 的增加最大的翻转角度 θ_{max} 减小。因此，饱和区域越宽需要在外围区域产生饱和的脉冲越多。如果饱和的时间常数为 T_s ，则只有 $T_1 > T_s$ 的自旋能够完全饱和。因此，可以实现一种在饱和带宽和仍然能够实现饱和的、最低的 T_1 之间的折衷方案。这还说明，在某些实施例中，通过将 t_{free} 降低到用可行硬件（这里的硬件问题可能包括相位切换时间、脉冲上升和下落时间以及用较长的连续的 RF 脉冲使 RF 电路过载）所能够实现的可能的最低值，以保持序列尽可能地短是有利的。

附图 24 和 25 所示分别为具有（附图 24）和没有（附图 25） t_{free} 的序列的损失 102 和 104。所示的损失 102 和 104 针对不同的驰豫时间。对于 $t_{free} = 375 \mu s$ ，100 个再聚焦脉冲的序列是 40ms 长，如果没有自由发展时间，该序列只有 2.4ms 长。对于标称的翻转角度 $\alpha(0) = 35^\circ$ 时，两序列都能够使自由流体的驰豫时间 ($T_1 > 50ms$) 的自旋饱和，但没有自由发展时间的序列能够使具有比 T_1 低 20 倍的自旋饱和，这对于那些想解决约束流体内部的自旋分布问题的人是需要的。

在这两情况中，产生饱和所需要的能量是单个 180° 再聚焦脉冲所需要的能量的 $100 \cdot \frac{35}{180} \approx 20$ 倍，这对于井下的核磁共振（NMR）波谱仪来说并不存在严重问题，这种核磁共振波谱仪通常能够在 t_v 期间从存储在电容器中的能量中产生好几百个 180° 再聚焦脉冲串。

在一些实施例中，由具有包括自由发展时间的序列加热的分布比由连续辐射的序列加热的分布要稍微平滑些。这可能源于在自由发展时间内产生的附加相位差（在第二种情况中没有），但这不是决定性的。此外，如果具轴向几何对称磁场的测井仪错位的距离为 $\Delta\bar{y}$ ，根据每个自旋在其位置的方位角，每个自旋都要在频率空间中移动不同的位移 $\Delta\omega = \frac{d\omega_0}{d\bar{y}} \cdot \Delta\bar{y}$ 。这就使实际的饱和分布更加显著地光滑。

在模拟实验中应用随机发生器选择四个脉冲相位。因此在不同的模拟实验中序列性能有稍微的变化。在某些实施例中，可以应用一预定相位的序列以使饱和性能最优。在某些实施例中，最佳参数的变化是没有周期性的。

总之，上面描述了对于在 NMR 共振区域的邻近区域中的自旋的预处理的示例性技术。即使在 NMR 装置（比如，NMR 测井仪 60 或 35）相对样本之间是移动的，这些技术都允许基于极化的 T1 测量，并且这些技术允许至少连同如美国专利申请（申请系列号为 NO. 09, 033, 965, 如上所引用）中所描述的具有低的梯度场一起在不稳定地进行钻井的同时进行基于极化的测量。使测井仪在没有稳定器的情况下能够运行，这样就使其成为更“与钻机友好”，由此极大地增加边钻井边记录（LWD）测井仪的使用性。

虽然通过有限数目的实施例描述了本发明，但对于本领域熟练的技术人员来说，在本申请公开的内容的帮助下能够理解并由此作出各种改进和变型。附加权利要求所覆盖的所有的这种改进和变型都将落入本发明的精神和范围内。

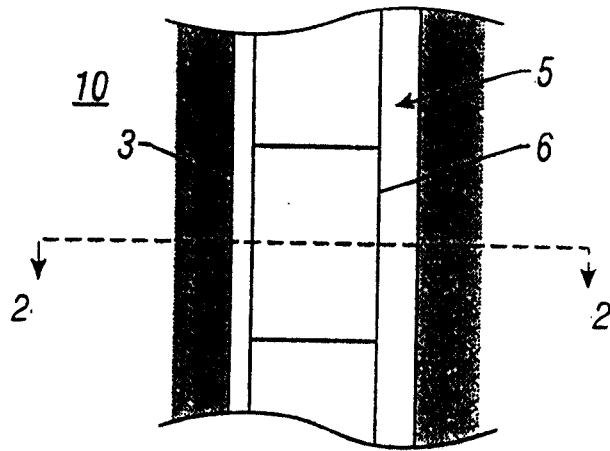


图 1

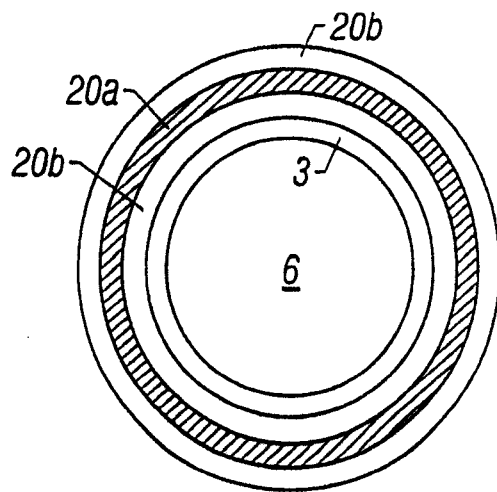


图 2

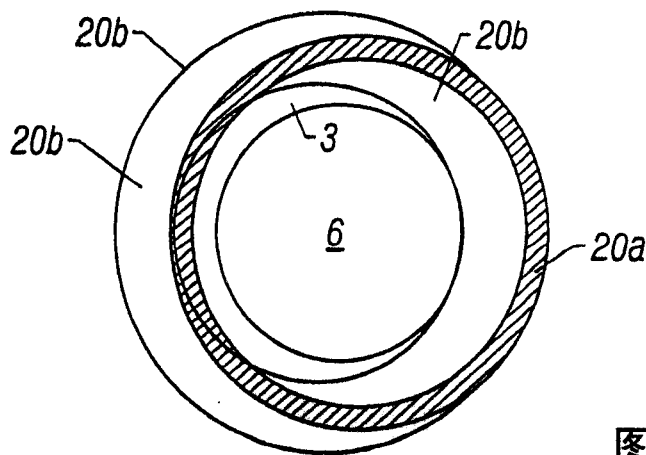


图 3

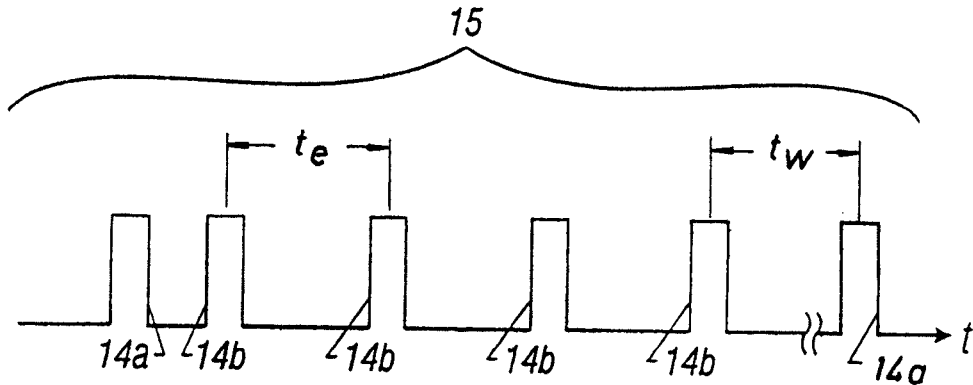


图 4

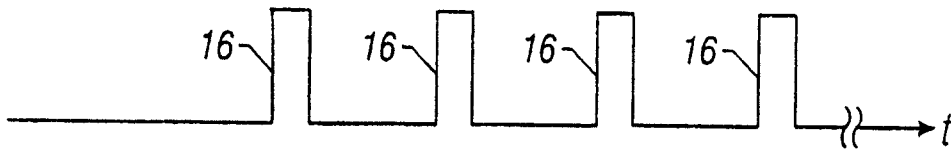


图 5

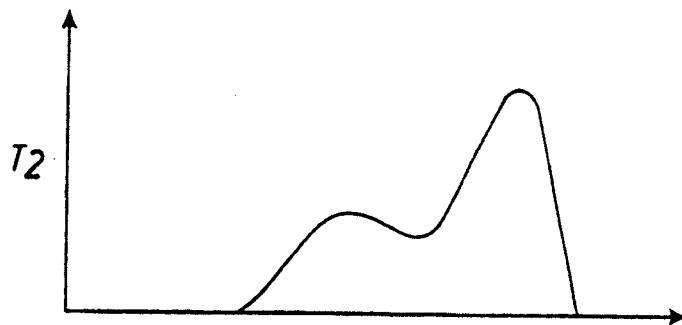


图 6

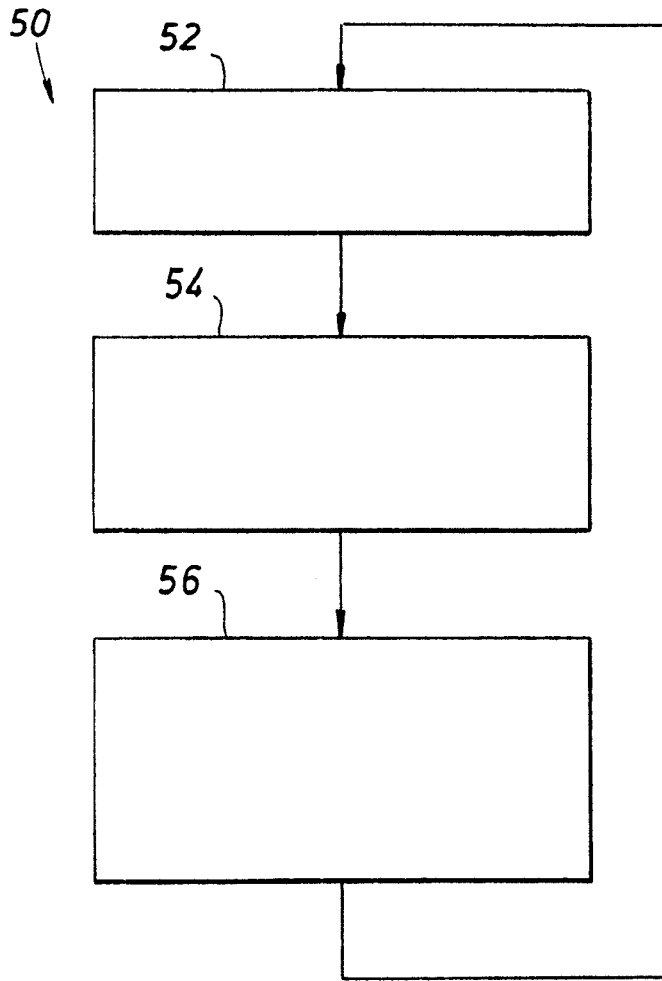


图 7

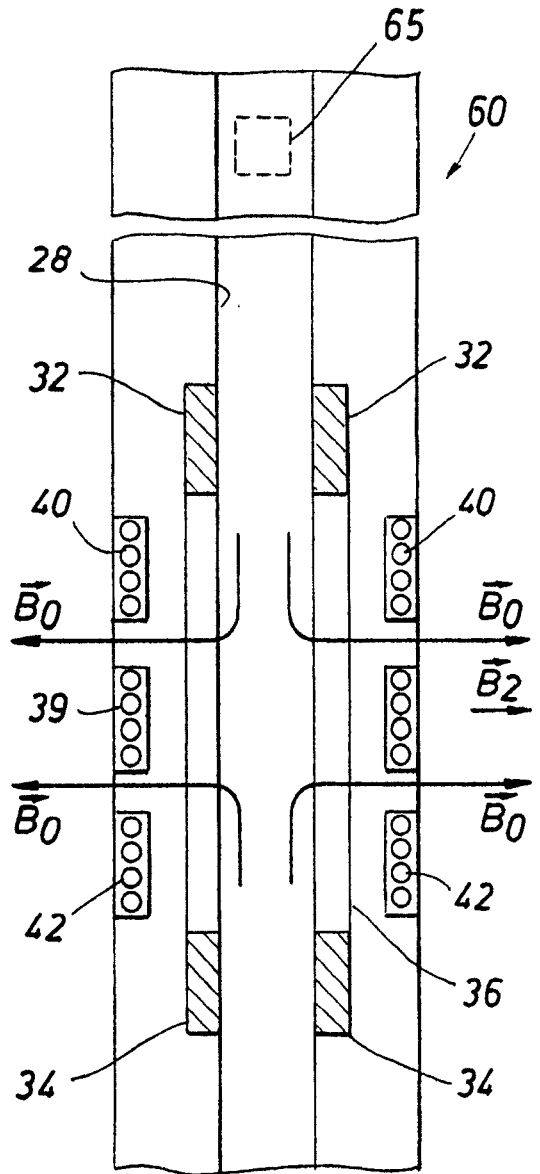


图 8

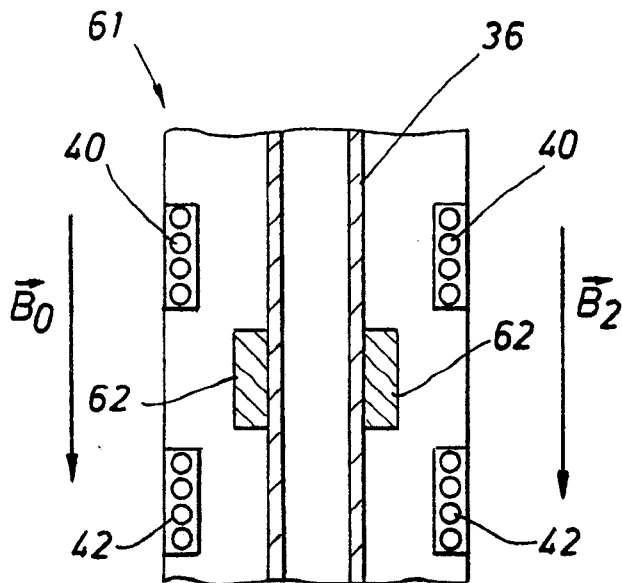


图 9

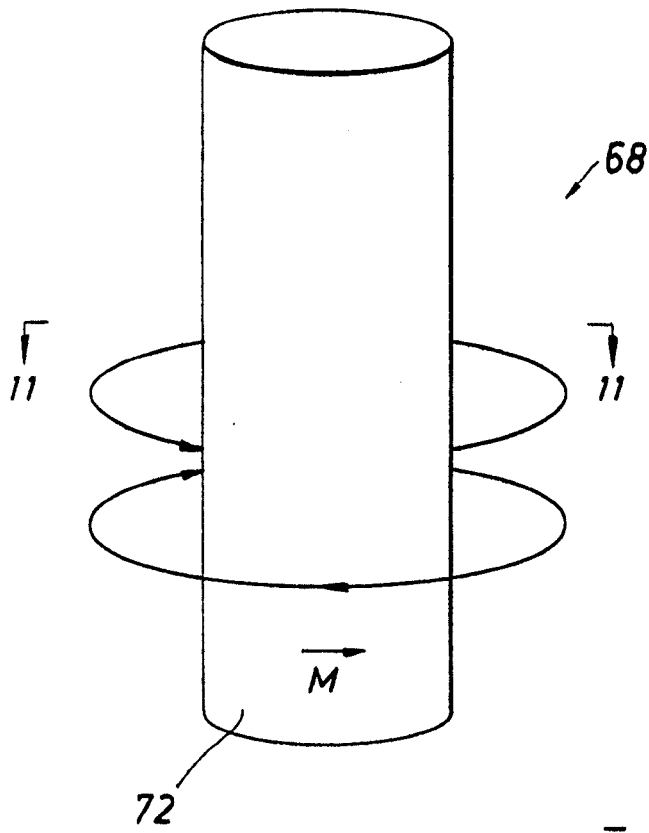


图 10

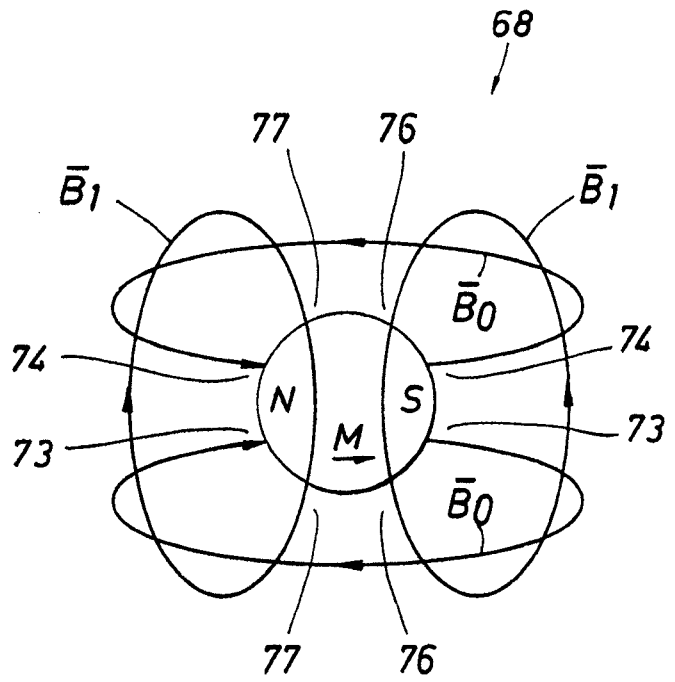


图 11

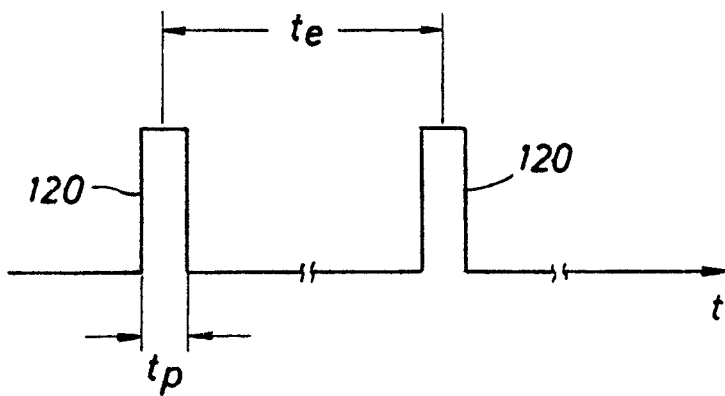


图 12

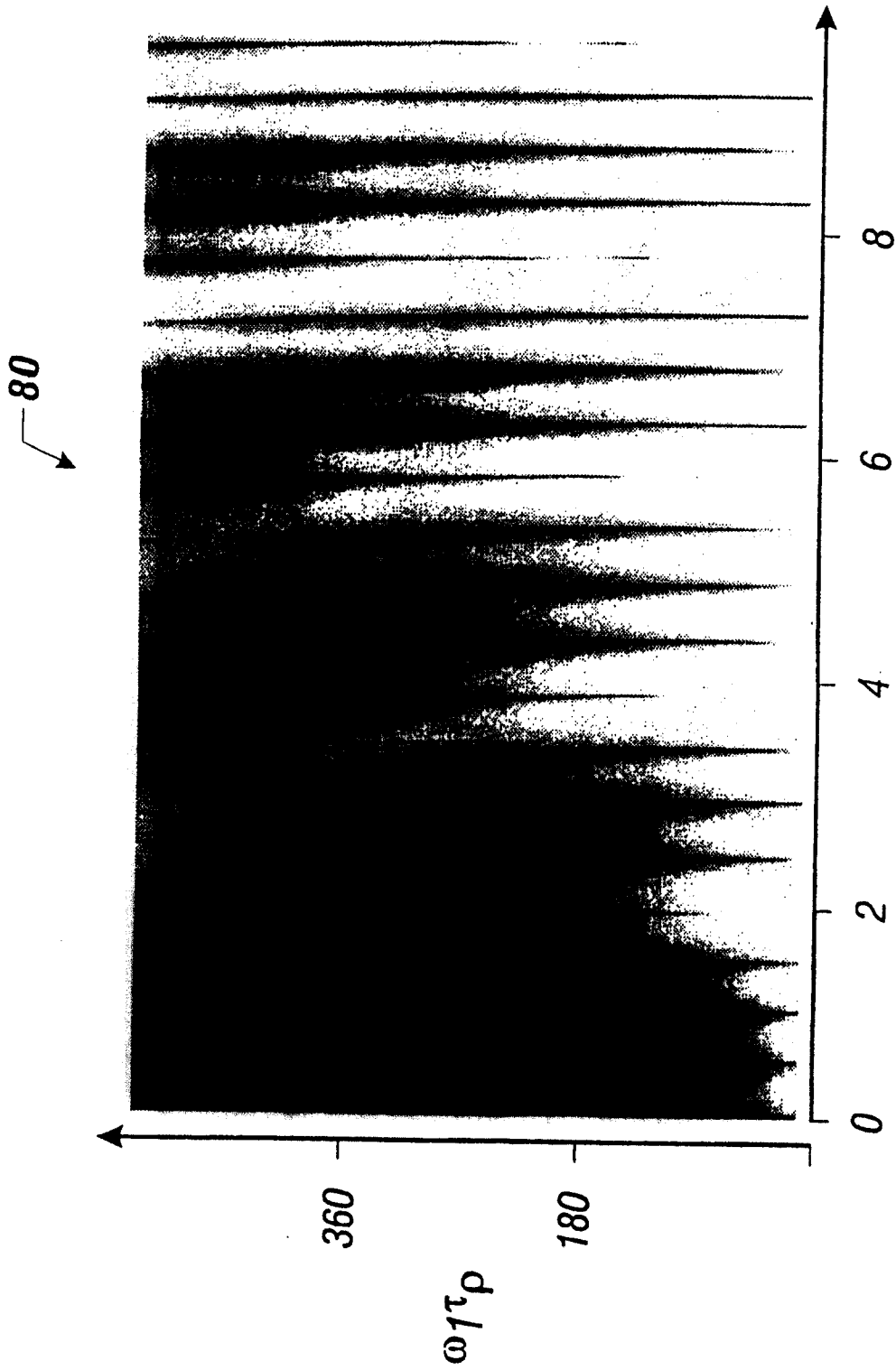


图 13

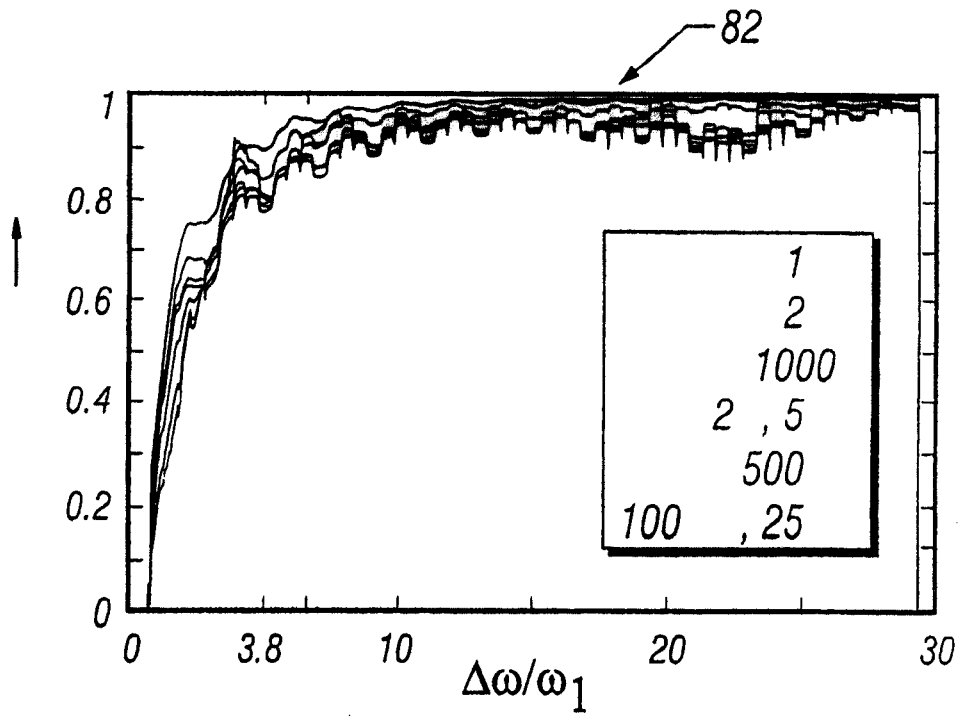


图 14

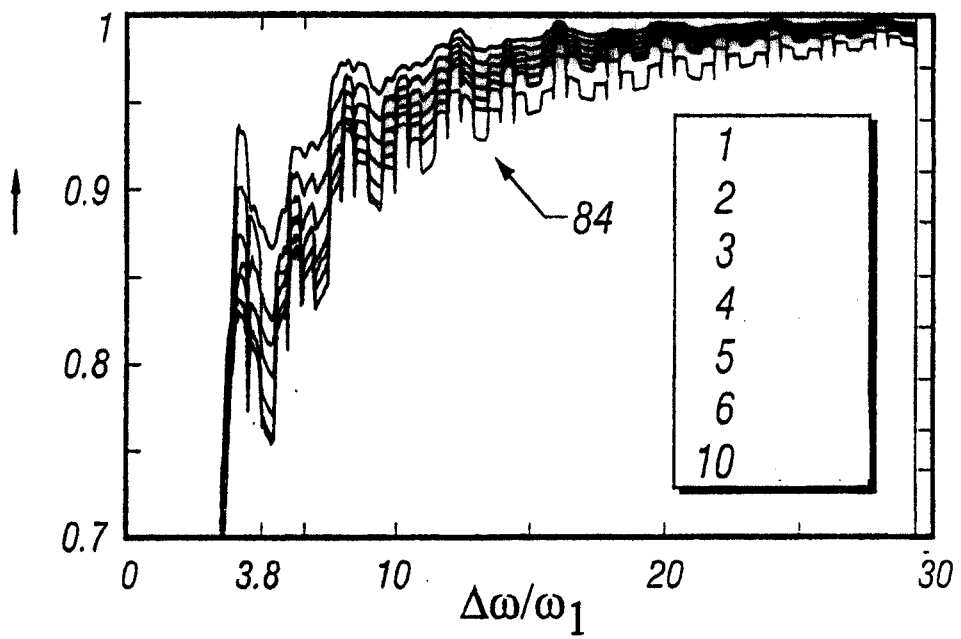


图 15

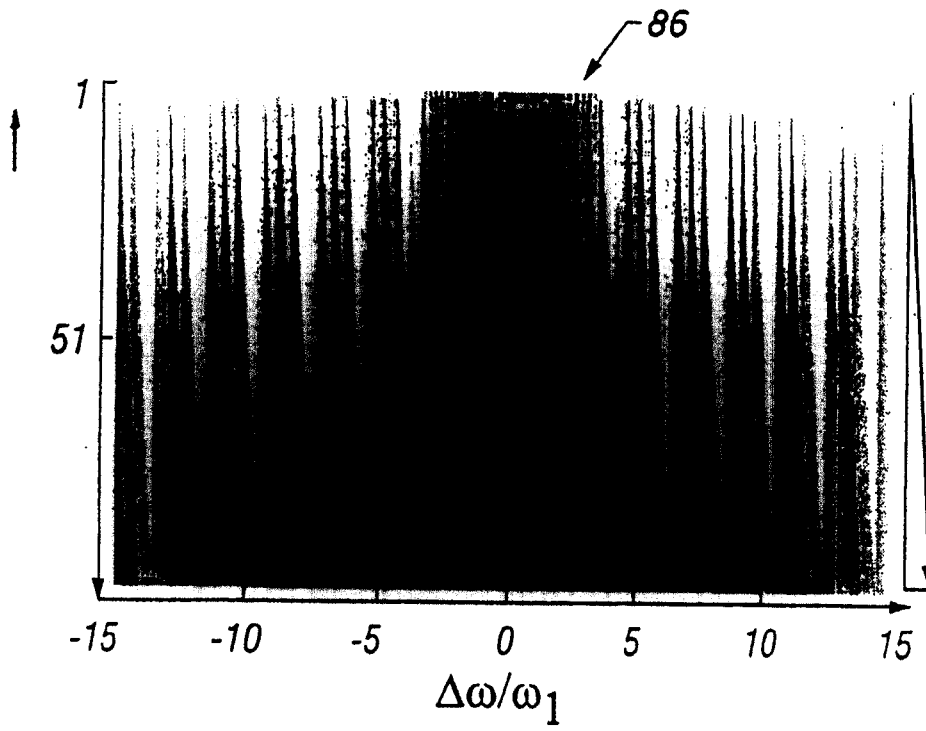


图 16

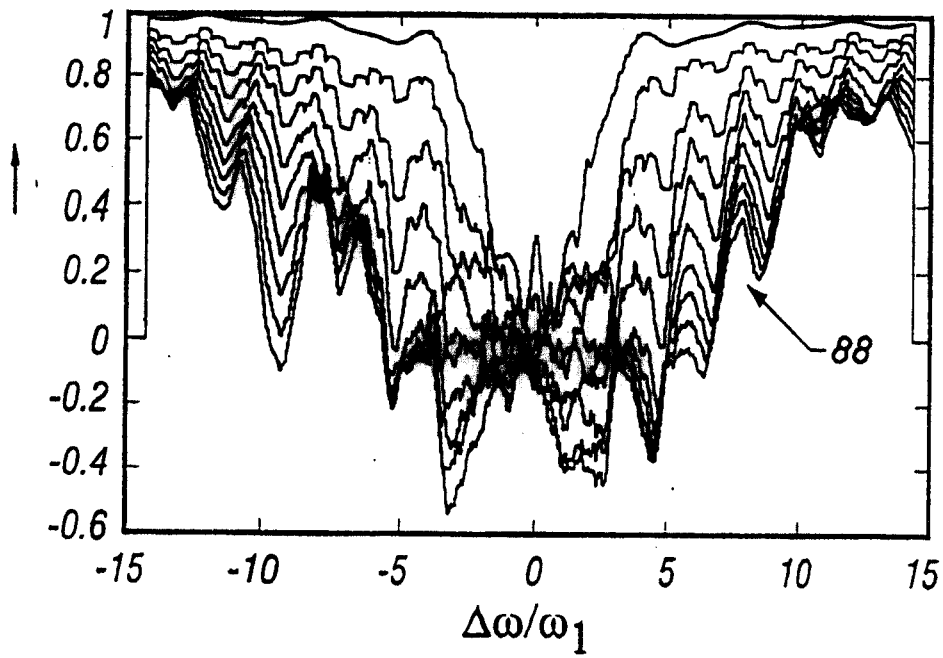


图 17

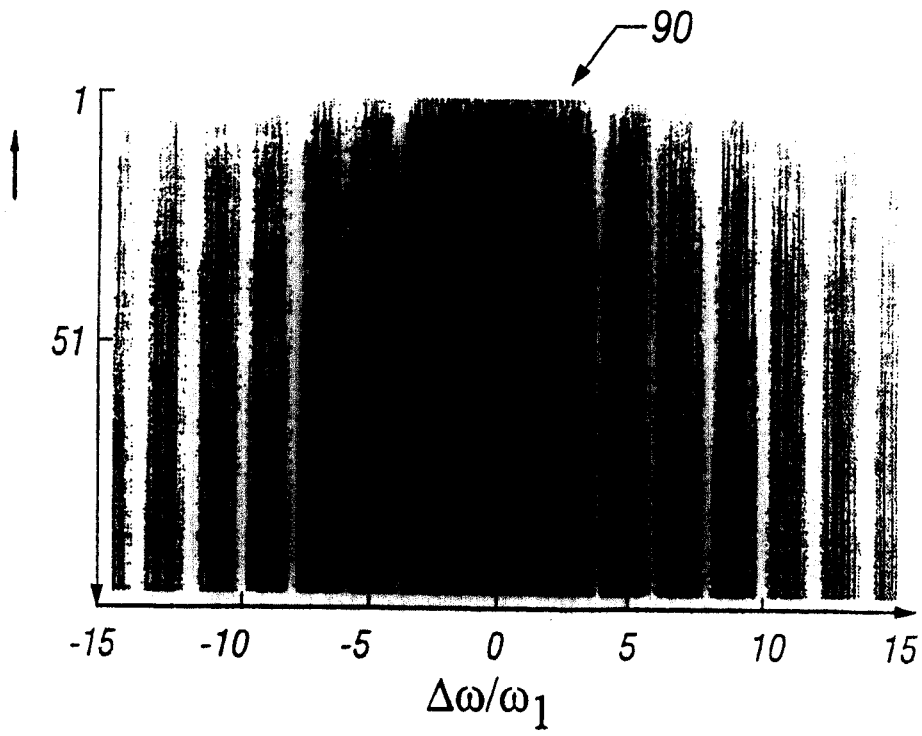


图 18

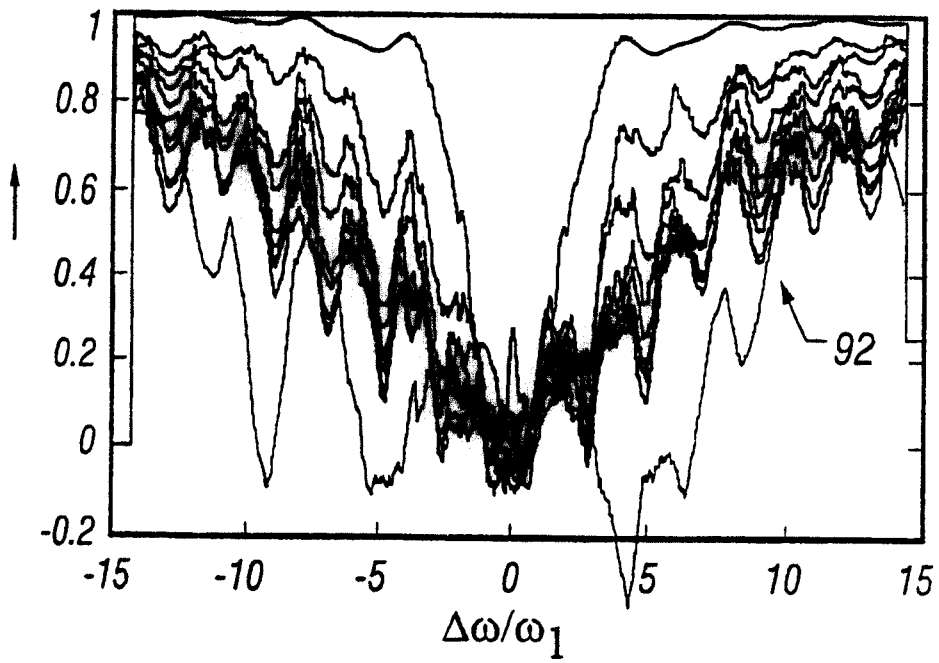


图 19

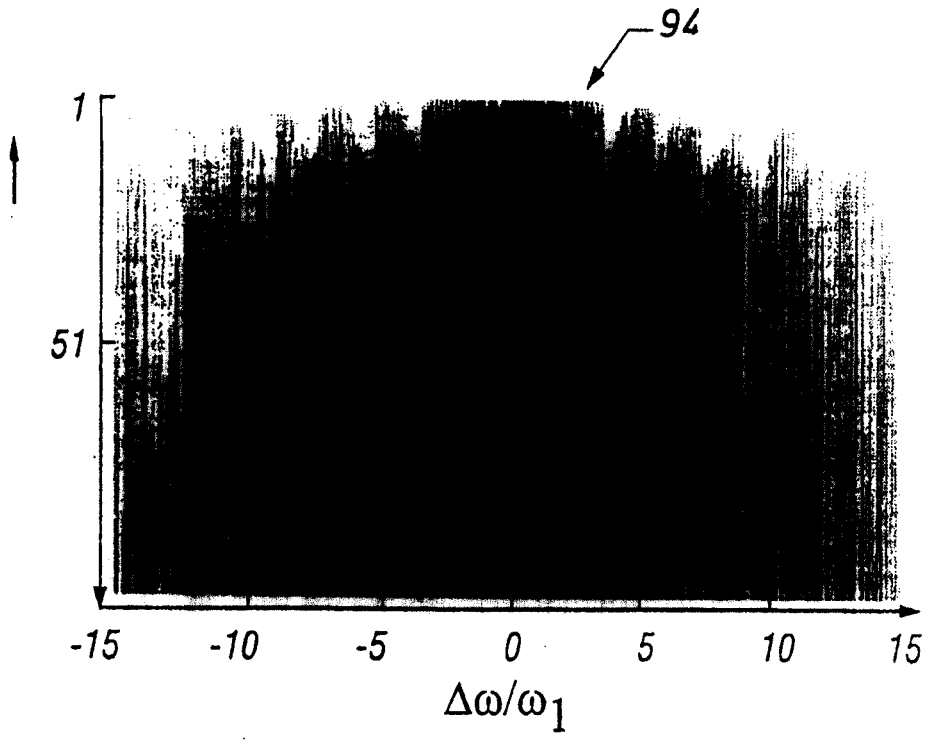


图 20

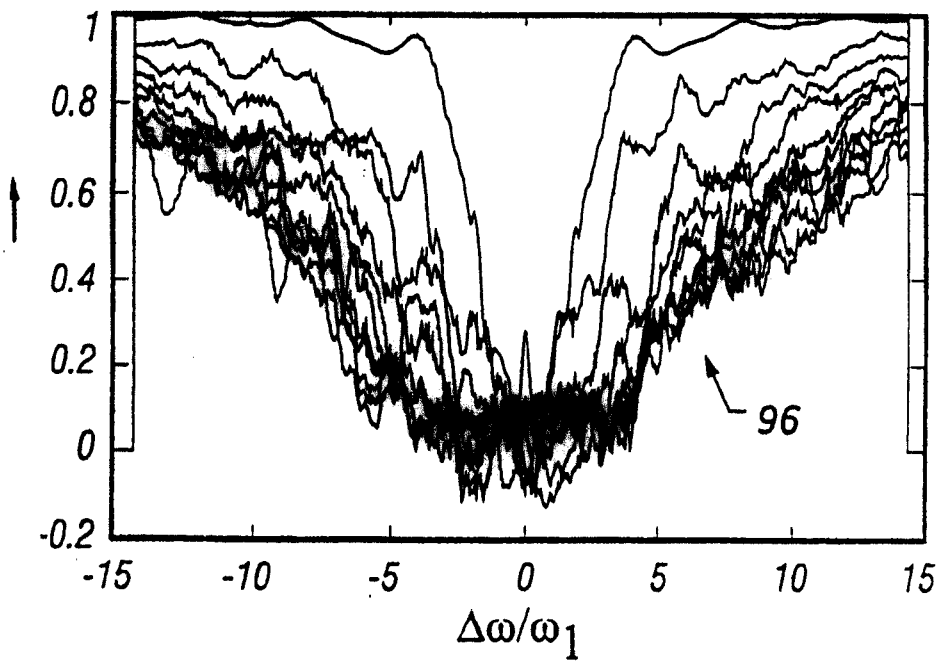


图 21

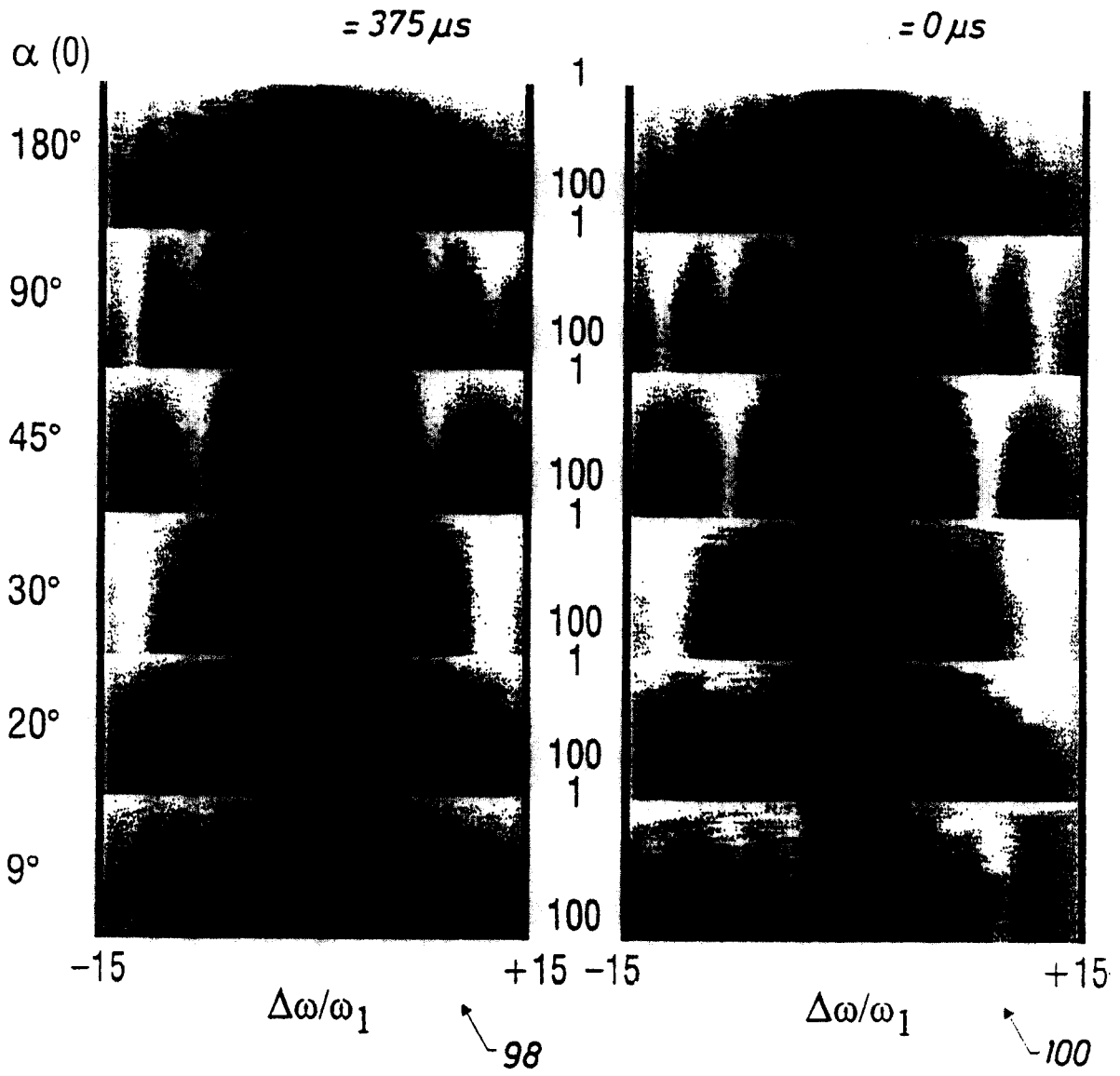


图 22

图 23

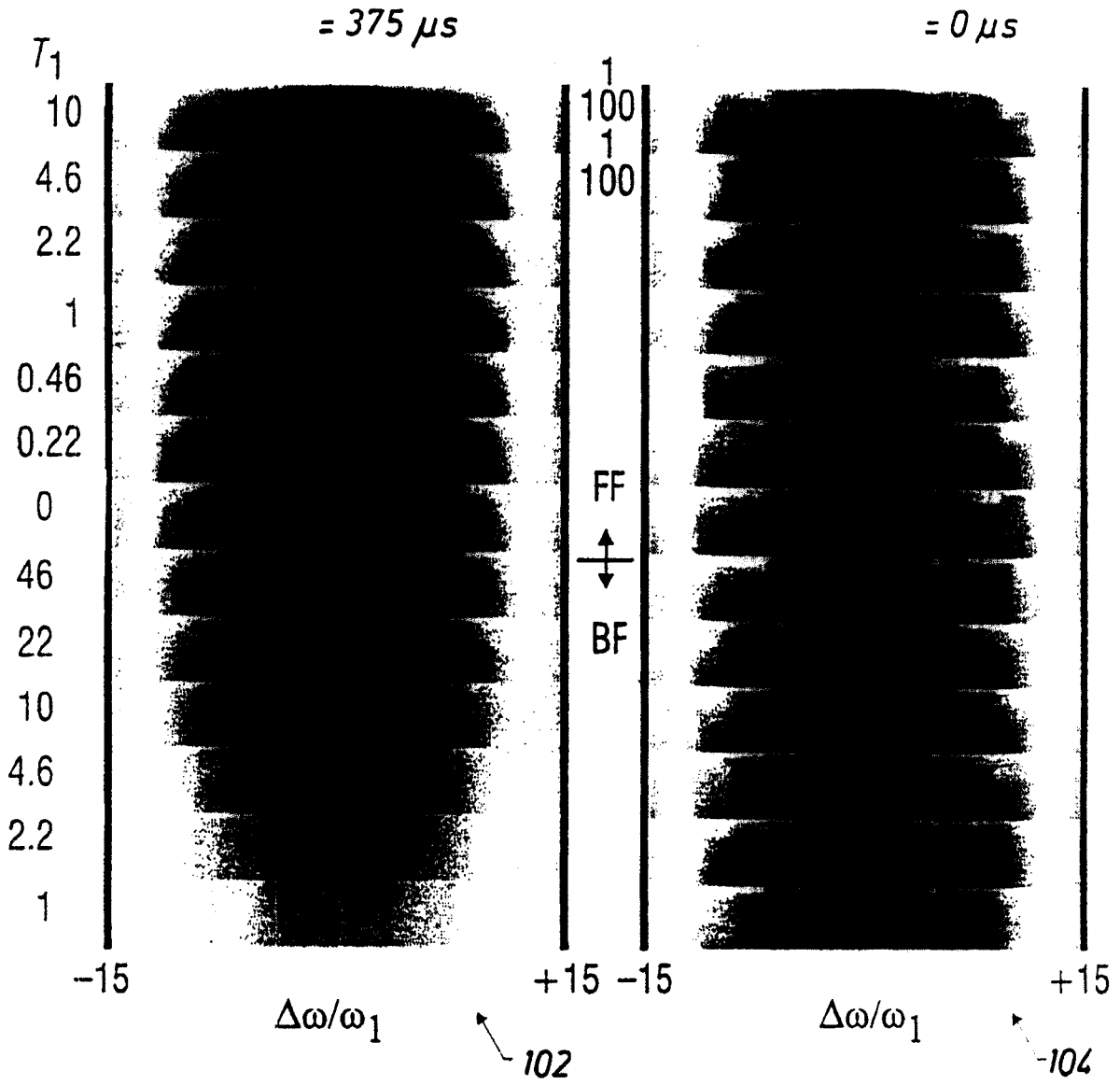


图 24

图 25