三、發明人：（共 7 人）

1. 比利　W　沃德
WARD, BILLY W.

2. 約翰　A　諾提四世
NOTTE, JOHN A. IV

3. 路易士　S　法卡斯三世
FARKAS, LOUIS S. III

4. 藍道爾　G　柏西佛
PERCIVAL, RANDALL G.

5. 雷蒙　希爾
HILL, RAYMOND

6. 拉爾斯　馬克渥特
MARKWORT, LARS

7. 德克　艾德霍
ADERHOLD, DIRK

國　籍：（中文/英文）

1. 美國　U.S.A.
2. 美國　U.S.A.
3. 美國　U.S.A.
4. 美國　U.S.A.
5. 美國　U.S.A.
6. 德國　GERMANY
7. 德國　GERMANY

四、聲明事項：

☐ 主張專利法第二十二條第二項☐第一款或☐第二款規定之事實，其事實發生日期為：　年　月　日。

☑ 申請前已向下列國家（地區）申請專利：

【格式請依：受理國家（地區）、申請日、申請案號　順序註記】

☑ 有主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

1. 美國；2005年12月02日；60/741,956
2. 美國；2006年03月20日；11/385,215
3. 美國；2006年03月20日；11/385,136
4. 美國；2006年03月20日；60/784,390
5. 美國；2006年03月20日；60/784,388
6. 美國；2006年03月20日；60/784,331
7. 美國；2006年03月20日；60/784,500
8. 美國；2006年04月28日；60/795,806
9. 美國；2006年05月09日；60/799,203

☐ 無主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

1.

2.

☐ 主張專利法第二十九條第一項國內優先權：

【格式請依：申請日、申請案號　順序註記】

☐ 主張專利法第三十條生物材料：

☐ 須寄存生物材料者：

國內生物材料 【格式請依：寄存機構、日期、號碼　順序註記】

國外生物材料 【格式請依：寄存國家、機構、日期、號碼　順序註記】

☐ 不須寄存生物材料者：

所屬技術領域中具有通常知識者易於獲得時，不須寄存。

九、發明說明：

【發明所屬之技術領域】

該揭示案係關於離子源、系統及方法。

【先前技術】

可以使用(例如)液態金屬離子源或氣體場離子源形成離子。在某些實例中，可以將藉由離子源形成的離子用於決定曝露於該等離子的一樣本之某些特性，或用於修改該樣本。在其他實例中，可以將藉由一離子源形成的離子用於決定該離子源本身之某些特徵。

【發明內容】

一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以在一樣本之一表面上產生具有一光點大小之離子束的氣體場離子源，該光點大小具有10 nm或更小之一尺寸。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用在一樣本之一表面上產生具有一光點大小之離子束的離子源，該光點大小具有3 nm或更小之一尺寸。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用在一樣本之一表面上產生具有1×10^{9} A/cm^2sr或更大的亮度之離子束的氣體場離子源。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以在一樣本之一表面上產生具有5×10^{8} A/m^2srV或更大的減小亮度之離子束的氣體場離子源。

一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體

相互作用以產生具有$5\times10^{-21}cm^2sr$或更小的展度之離子束的氣體場離子源。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生$1\times10^{-16}cm^2srV$或更小的減小展度之離子束的氣體場離子源。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含包括一導電尖端之一氣體場離子源。該氣體場離子源能夠與一氣體相互作用以產生離子束達一周或更長之一時間週期而無需從該系統移除導電尖端。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含一氣體場離子源，該氣體離子源能夠與一氣體相互作用以產生離子束達一周或更長之一時間週期，其具有10個小時或更短之一總中斷時間。

一方面，本發明的特徵為能夠產生一樣本之一影像的一離子顯微鏡。該樣本係不同於該離子顯微鏡，並且該樣本之該影像個有3 nm或更小之解析度。

另一方面，本發明的特徵為能夠產生一樣本之一影像的氣體場離子顯微鏡。該樣本係不同於該氣體場離子顯微鏡，並且該樣本之該影像個有10 nm或更小之解析度。

另一方面，本發明的特徵為具有0.25或更大之品質因數的氣體場離子顯微鏡。

另一方面，本發明的特徵為具有25 nm或更小之損壞測試值的離子顯微鏡。

一方面，本發明的特徵為一離子顯微鏡，其包含具有一

導電尖端的離子源，該導電尖端具有一終端架，其具有20個或更少原子。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含具有一導電尖端之一氣體場離子源，該導電尖端具有從15°至45°的平均全錐角。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含包括具有200 nm或更小的平均曲率半徑之一導電尖端的氣體場離子源。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含一氣體場離子源，該離子源具有一導電尖端，該導電尖端具有一終端架，其具有一或多個原子。配置該系統，以便在使用該系統期間該等一或多個原子與一氣體相互作用以產生離子束，並且經由氣體與該等一或多個原子之僅一個原子的相互作用來產生離子束中到達一樣本之一表面的離子之70%或更多。

一方面，本發明的特徵為一系統，其包含具有能夠與一氣體相互作用以產生離子束的一導電尖端之氣體場離子源。該系統亦包含離子光學，其得到配置以便在使用期間離子束之至少一部分穿過該離子光學。該系統進一步包含一移動機制，其係與氣體場離子源耦合以便該移動機制可以轉移導電尖端、傾斜導電尖端或實施兩者。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生一離子束的離子源，該離子束可與一樣本相互作用以使多種不同類型的粒子離開該樣本。該系統

亦包含至少一個偵測器，其係配置成偵測多種不同類型的粒子之至少兩種不同類型粒子。多種不同類型的粒子係選自二次電子、歐傑電子、二次離子、二次中性粒子、一次中性粒子、散射離子與光子。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使粒子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該等粒子係選自歐傑電子、二次離子、二次中性粒子、一次中性粒子、散射離子與光子。該系統亦包含至少個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器偵測該等粒子之至少某些來決定關於樣本的資訊。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使粒子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含至少一個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器可以偵測該等粒子之至少某些。對於一給定的偵測粒子而言，該至少一個偵測器根據該給定的偵測粒子之一能量而產生一信號。

一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使粒子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含至少一個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器可以偵測該等粒子之至少某些。對於一給定的偵測粒子而言，該至少一個偵測器根據該給定的偵測粒子之一軌道的角度而

產生一信號。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使散射離子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含至少一個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器可以偵測該等散射離子之至少某些。該系統進一步包含一電子處理器，其係與該至少一個偵測器電性連接以便在使用期間該電子處理器可以根據偵測的散射離子而處理資訊以決定關於該樣本的資訊。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使一次中性粒子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含至少一個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器可以偵測該等一次中性粒子之至少某些。該系統進一步包含一電子處理器，其係與該至少一個偵測器電性連接以便在使用期間該電子處理器可以根據偵測的一次中性粒子而處理資訊以決定關於該樣本的資訊。

一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使光子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含至少一個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器可以偵測該等光子之至少某些。該系統進一步包含一電子處理器，其係與該至少一個偵測器電性連接以便在使用期間該電子處理器可以根據偵測的光子而處理資訊以決定關於該

樣本的資訊。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使二次離子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含至少一個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器可以偵測該等二次離子之至少某些。該系統進一步包含一電子處理器，其係與該至少一個偵測器電性連接以便在使用期間該電子處理器可以根據偵測的二次離子而處理資訊以決定關於該樣本的資訊。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使二次中性粒子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含至少一個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器可以偵測該等二次中性粒子之至少某些。該系統進一步包含一電子處理器，其係與該至少一個偵測器電性連接以便在使用期間該電子處理器可以根據偵測的二次中性粒子而處理資訊以決定關於該樣本的資訊。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使歐傑電子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含至少一個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器可以偵測該等歐傑電子之至少某些。該系統進一步包含一電子處理器，其係與該至少一個偵測器電性連接以便在使用期間該電子處理器可以根據偵測的歐傑電子而處理資訊以

決定關於該樣本的資訊。

一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使離子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含至少一個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器可以偵測該等離子。離子束與樣本的相互作用可使二次電子離開樣本，並且當離子束與樣本的相互作用使二次電子離開樣本時，至少一個偵測器可以偵測該等離子之至少某些而不偵測該等二次電子。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使中性粒子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含至少一個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器可以偵測該等中性粒子。離子束與樣本的相互作用可使二次電子離開樣本，並且當離子束與樣本的相互作用使二次電子離開樣本時，至少一個偵測器可以偵測該等中性粒子之至少某些而不偵測該等二次電子。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生可與一樣本相互作用以使光子離開該樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含至少一個偵測器，其得到配置以便在使用期間該至少一個偵測器可以偵測該等光子。離子束與樣本的相互作用可使二次電子離開樣本，並且當離子束與樣本的相互作用使二次電子離開樣本時，至少一個偵測器可以偵測該等光子之至少某些而不

偵測該等二次電子。

一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以在一樣本之一表面上產生具有一光點大小之離子束的氣體場離子源，該光點大小具有10 nm或更小之一尺寸。該系統亦包含離子光學，其係配置成將離子束引導至樣本之表面，該離子光學具有至少一個可調整設定。當離子光學之可調整設定係處於第一設定時，離子束會與樣本之第一位置相互作用。當離子光學之可調整設定係處於第二設定時，離子束會與樣本之第二位置相互作用。離子光學之第一設定係不同於離子光學之第二設定，並且樣本之第一位置係不同於樣本之第二位置。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠與一氣體相互作用以產生引導至一樣本的離子束之氣體場離子源。該系統亦包含一帶電粒子來源，其得到配置以便在使用期間該帶電粒子來源提供引導至樣本的一帶電粒子束。氣體場離子源係不同於帶電粒子來源。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含使一離子束與一樣本相互作用以使多種不同類型粒子離開該樣本，以及偵測該等多種不同類型粒子之至少兩種不同類型的粒子。多種不同類型的粒子係選自二次電子、歐傑電子、二次離子、二次中性粒子、一次中性粒子、散射離子與光子。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該

離子束與一樣本相互作用以使粒子離開該樣本。該等粒子係選自歐傑電子、二次離子、二次中性粒子、一次中性粒子、散射離子與光子。該方法亦包含偵測該等粒子之至少某些以決定關於該樣本的資訊。

一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一樣本相互作用以使粒子離開該樣本。該方法亦包含根據藉由一偵測器所偵測的一粒子之一能量而產生自該偵測器的一信號。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一樣本相互作用以使粒子離開該樣本。該方法亦包含根據藉由一偵測器所偵測的一粒子之一軌道的角度而產生自該偵測器的一信號。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一樣本相互作用以使散射離子離開該樣本。該方法亦包含偵測該等散射離子之至少某些，以及根據偵測的散射離子而決定關於該樣本的資訊。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一樣本相互作用以使一次中性粒子離開該樣本。該方法亦包含偵測一次中性粒子之至少某些，以及根據偵測的一次中性粒子而決定關於該樣本的資訊。

一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一樣本相互作用以使光子離開該樣本。該方法亦包含偵測該等光子之至少某些，以及根據偵測的光子而決定關於該樣本的資訊。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一樣本相互作用以使二次離子離開該樣本。該方法亦包含偵測至少該等二次離子之至少某些。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一樣本相互作用以使二次中性粒子離開該樣本。該方法亦包含偵測二次中性粒子或得自二次中性粒子的粒子之至少某些。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一樣本相互作用以使歐傑電子離開該樣本。該方法亦包含偵測至少該等歐傑電子之至少某些。

一方面，本發明的特徵為一方法，其包含形成一氣體場離子源，並且在形成該氣體場離子源之後，將該離子源置放於一反應室中以提供一氣體場離子系統。

另一方面，形成具有一發射軸線的一離子源，並且在形成該離子源之後，將該離子源之該發射軸線與一離子光學系統之一入口軸線對準。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，該離子束在一樣本之一表面上具有一光點大小，其具有10 nm或更小之一尺寸，以及將該離子束從該樣本之該表面上的一第一位置移動至該樣本之該表面上的一第二位置，該第一位置係不同於該第二位置。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使一樣本與該離子束接觸。該方法亦包含使該樣本與自一帶電粒子來源的一帶電粒子束接觸。

一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一樣本相互作用以使粒子離開該樣本。該方法亦包含偵測該等粒子之至少某些，以及根據偵測的粒子而決定關於該樣本的結晶資訊。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及在該樣本之一部分上引發一電壓。該方法亦包含偵測粒子以決定關於該樣本的電壓對比度資訊。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一樣本相互作用以使粒子離開該樣本。該樣本包含至少一第一材料與一第二材料。該方法亦包含根據該等粒子而區分該等第一與第二材料。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一活化氣體相互作用以促進一樣本之一表面上的化學反應。

一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使用該離子束以決定關於半導體物件的次表面資訊。該方法亦包含根據次表面資訊而編緝半導體物件。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使用該離子束以決定關於半導體物件的資訊。該離子束在該半導體物件之一表面上具有10 nm或更小之一光點大小。該方法亦包含根據該資訊而編緝半導體物件。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使用該離子束以決定關於一微影光罩的資訊。該離子束在該半導體物件之一表面上具有10 nm或更小之一光點大小。該方法亦包含根據該資訊而修復該微影光罩。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含使用一離子束以在一樣本上圖案化一光阻。該離子束在該樣本上具10 nm或更小之光點大小。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與包含一特徵的一樣本接觸。該離子束在一樣本之

一表面上具有50 nm或更小之一光點大小。該方法亦包含決定該特徵之大小。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一離子束，以及使該離子束與一樣本相互作用以使粒子離開該樣本。該樣本具有包含第一及第二層的多堆疊層。該方法亦包含偵測該等粒子以決定是否採用第一層來暫存第二層。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含將一樣本曝露於一聚焦式離子束，並藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一第二離子束。該方法亦包含將該樣本曝露於該第二離子束。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含當氣體場離子源係出現在一離子顯微鏡內時形成一氣體場離子源之一導電尖端。

一方面，本發明的特徵為一系統，其包含一離子源。該系統能夠在第一模式中使離子源成像，並且該系統能夠在第二模式中使用離子源以收集一樣本之一影像。該樣本係不同於該離子源。

另一方面，本發明的特徵為一樣本操縱器，其包含一外罩、藉由該外罩支撐的一圓盤、藉由該圓盤支撐一部件(該部件具有支架與配置成支撐一樣本的一表面)以及一器件。該器件接觸該部件以在第一模式中移動該樣本，並且該器件在第二模式中並不與該部件接觸。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含一氣體場離

子源及一樣本操縱器。該樣本操縱器包含一外罩、藉由該外罩支撐的一圓盤、藉由該圓盤支撐一部件(該部件具有支架與配置成支撐一樣本的一表面)以及一器件。該器件接觸該部件以在第一模式中移動該樣本，並且該器件在第二模式中並不與該部件接觸。

一方面，本發明特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生包含離子的一第一離子束，以及從該第一離子束移除非單一帶電化學物種以形成包含單一帶電離子的一第二離子束。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含一氣體場離子源，該氣體場離子源能夠與一氣體相互作用以產生包括化學物種的一束，該等化學物種包含帶電化學物種。該系統亦包含至少一個偏壓電極，其係配置成使離子束中的化學物種之離子束路徑根據化學物種之電荷而發散。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣場離子源互動而產生離子，以及採用離子來噴濺一樣本。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣場離子源互動而產生一離子束，以及使用不同於該氣體離子源的一系統來產生一電子束。該方法亦包含使用該離子束與該電子束以調查一樣本。

另一方面，本發明的特徵為一系統，其包含能夠提供一電子束的一掃描電子顯微鏡。該系統亦包含能夠與一氣體相互作用以產生一離子束的一氣體場離子源。固定掃描電

子顯微鏡及氣體場離子顯微鏡以便在使用期間可以將該電子束與該離子束用於調查一樣本。

另一方面，本發明的特徵為一方法，其包含藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用而產生一第一離子束。該第一離子束具有一第一電流。該方法亦包含使用具有該第一電流的該第一離子束以製備用於調查一樣本的該氣體場離子源。該方法亦包含藉由使一氣體與該氣體場離子源相互作用而產生一第二離子束。該第二離子束具有一第二電流。另外，該方法亦包含使用該第二離子束以調查該樣本。

具體實施例可包含下列優點之一或多個。

在某些具體實施例中，一離子源(例如一氣體場離子源)可以在一樣本之表面上提供相對較小的光點大小。使用此離子源的一離子顯微鏡(例如一氣體場離子顯微鏡)可以(例如)獲得具有相對較高解析度的一樣本之一影像。

在某些具體實施例中，一離子源(例如一氣體場離子源)可以具有相對較高的亮度及/或相對較高的減小亮度。使用此離子源的一離子顯微鏡(例如一氣體場離子顯微鏡)可以(例如)在相對較短的時間週期內得到一樣本之良好品質影像，此依次可以增加可以使大量樣本成像所採用的速度。

在某些具體實施例中，一離子源(例如一氣體場離子源)可以因給定的離子電流(例如相對較低的展度)而具有相對較高的亮度。使用此離子源的一離子顯微鏡(例如一氣體

場離子顯微鏡)可以(例如)得到一樣本之良好品質影像，其具有對該樣本之相對較小的損壞。

在某些具體實施例中，一氣體場離子顯微鏡可以具有相對較高的可靠性。因此，可以使用(例如)氣體場離子源達延長的時間週期而無需取代氣體場離子源，此可以(例如)增加可以使大量樣本成像所採用的速度，減少與使大量樣本成像相關聯的停機時間，及/或減小與使大量樣本成像相關聯的成本。

在某些具體實施例中，配置一離子顯微鏡(例如一氣體場離子顯微鏡)以便實質上從離子源去耦合振動。此舉可以增強離子顯微鏡達到上述優點之或多個的能力。

在某些具體實施例中，一離子顯微鏡(例如氣體場離子顯微鏡)可以在相較高度的溫度下加以操作，同時仍提供上述優點之一或多個。例如，可以將液態氦用作離子顯微鏡所需的冷卻劑。此舉可以減小與使用某些其他冷卻劑(例如液態氦)相關聯的成本及/或複雜性。此舉亦可以減少與可能建立實質振動的液態氦冷卻劑所用之某些機械系統相關聯的潛在問題。

將從下列說明、附圖及申請專利範圍瞭解本發明之其他特徵與優點。

【實施方式】

一般介紹

離子可以在顯微鏡系統中產生並用於樣本成像及其他應用。使用氣體場離子源以產生可用於樣本分析(例如成像)

的離子之顯微鏡系統係稱為氣體場離子顯微鏡。氣體場離子源為包含一導電尖端(通常具有帶10個或更少原子的頂點)之器件，可以將該導電尖端用於離子化中性氣體物種以藉由下列方式產生離子(例如採用離子束的形式)：使中性氣體物種處於導電尖端附近(例如在約四至五埃的距離內)，同時將高正電位(例如相對於擷取器(參見以下說明)的1 kV或更大)施加於該導電尖端之頂點。

圖1顯示一氣體場離子顯微鏡系統100之示意圖，該系統包含一氣體來源110、一氣體場離子源120、離子光學130、一樣本操縱器140、一前側偵測器150、一背側偵測器160、以及經由通信線172a至172f與系統100之各組件電性連接的一電子控制系統170(例如電子處理器，如電腦)。將一樣本180固定在離子光學130與偵測器150、160之間的樣本操縱器140中/上。在使用期間，透過離子光學130將離子束192引導至樣本180之表面181，並且藉由偵測器150及/或160測量由離子束192與樣本180之相互作用所產生的粒子194。

一般而言，需要藉由抽空系統100而減少該系統中某些不合需要的化學物種之出現。通常而言，將系統100之不同組件維持在不同的背景壓力。例如，可以將氣體場離子源120維持在接近10^{-10} Torr之壓力。當將氣體引入氣體場離子源120時，背景壓力會上升至接近10^{-5} Torr。將離子光學130維持在接近10^{-8} Torr的背景壓力，然後將氣體引入氣體場離子源120。當引入氣體時，離子光學130中的背景壓

力通常會上升至接近10^{-7} Torr。將樣本180固定於通常維持在接近10^{-6} Torr之背景壓力的反應室中。此壓力不會由於氣體場離子源120中的氣體之出現或缺少而在很大程度上變動。

如圖2所示，氣體來源110係配置成供應一或多種氣體182給氣體場離子源120。如以下更詳細地說明，氣體來源110可加以配置成在各種純度、流量、壓力與溫度情況下供應氣體。一般而言，藉由氣體來源110供應的氣體之至少一種為惰性氣體(氦(He)、氖(Ne)、氬(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe))，並且需要該等惰性氣體的離子為離子束192中的主要組分。一般而言，如在樣一180之表面181上所測量，離子束192中的離子之電流會隨系統100中的惰性氣體之壓力的增加而無變化地增加。在某些具體實施例中，可藉由一冪律說明此關係，其中對於某一範圍的惰性氣體壓力而言，電流一般與氣體壓力成比例地增加。在操作期間，惰性氣體之壓力在鄰近於尖端頂點(參見以下說明)處通常為10^{-2} Torr或更小(例如10^{-3} Torr或更小、10^{-4} Torr或更小)，及/或10^{-7} Torr或更大(例如10^{-6} Torr或更大、10^{-5} Torr或更大)。一般而言，需要使用相對較高純度的氣體(例如，以減少系統中不合需要的化學物種之出現)。舉例而言，當使用氦時，氦可以係至少99.99%的純度(例如99.995%的純度、99.999%的純度、99.9995%的純度、99.9999%的純度)。同樣地，當使用其他惰性氣體(Ne氣體、Ar氣體、Kr氣體、Xe氣體)時，需要氣體的純度為高純度商用等級。

可視需要地，除惰性氣體以外，氣體來源110還可以供應一或多種氣體。如以下更詳細地說明，此氣體之一範例為氦。通常而言，雖然額外氣體可以在高於惰性氣體中的雜質之位準的位準情況下出現，但是額外氣體仍構成藉由氣體來源110引入的總體氣體混合物之少數成分。舉例而言，在藉由氣體來源110將氦氣體及Ne氣體引入氣體場離子源120的具體實施例中，總體氣體混合物可以包含20%或更少(例如15%或更少、12%或更少)的Ne，及/或1%或更多(例如3%或更多、8%或更多)的Ne。例如，在藉由氣體來源110引入氦氣體及Ne氣體的具體實施例中，總體氣體混合物可以包含5%從至15%(例如從8%至12%、從9%至11%)的Ne。另外舉例而言，在藉由氣體來源110引入氦氣體及氮氣體的具體實施例中，總體氣體混合物可以包含1%或更少(例如0.5%或更少、0.1%或更少)的氮，及/或0.01%或更多(例如0.05%或更多)的氮。例如，在藉由氣體來源110引入氦氣體及氮氣體的具體實施例中，總體氣體混合物可以包含0.01%從至1%(例如從0.05%至0.5%、從0.08%至0.12%)的氮。在某些具體實施例中，額外氣體係與惰性氣體混合，然後進入系統100(例如經由使用一氣體歧管，其混合氣體並接著透過單一進口將混合物遞送至系統100中)。在某些具體實施例中，額外氣體係與惰性氣體混合，然後進入系統100(例如一分離進口係用於將每種氣體輸入於系統100中，但是該等分離進口係足夠接近的，因此氣體變成混合式，然後與氣體場離子源120中的元素

之任一者相互作用)。

氣體場離子源120係配置成從氣體來源110接收一或多種氣體182並從氣體182產生氣體離子。氣體場離子源120包含具有一尖端頂點187的一導電尖端186、一擷取器190及可視需要的一抑制器188。通常而言，從尖端頂點187至樣本180之表面181的距離(圖2中未顯示)係5 cm或更大(例如10 cm或更大、15 cm或更大、20 cm或更大、25 cm或更大)，及/或100 cm或更小(例如80 cm或更小、60 cm或更小、50 cm或更小)。例如，在某些具體實施例中，從尖端頂點187至樣本180之表面181的距離係5 cm至100 cm(例如從25 cm至75 cm、從40 cm至60 cm、從45 cm至55 cm)。

導電尖端186可以採用各種材料形成。在某些具體實施例中，尖端186係採用金屬(例如鎢(W)、鉭(Ta)、銥(Ir)、銠(Rh)、鈮(Nb)、鉑(Pt)、鉬(Mo))形成。在某些具體實施例中，導電尖端186可以採用合金形成。在某些具體實施例中，導電尖端186可以採用不同材料(例如碳(C))形成。

在使用期間，尖端186針對擷取器190得到正偏壓(例如接近20 kV)，擷取器190針對外部接地得到正或負偏壓(例如從-20 kV至+50 kV)，以及可選抑制器188針對尖端186得到正或負偏壓(例如從-5 kV至+5 kV)。因為尖端186係採用導電材料形成，所以尖端186之電場在尖端頂點187處從尖端頂點187之表面向外指。由於尖端186之形狀，電場在尖端頂點187附近係最強。例如，藉由改變施加於尖端186的正電壓，可以調整尖端186之電場的強度。採用此組態，

藉由氣體來源110供應的未離子化氣體原子182得到離子化並在尖端頂點187附近變成帶正電離子。帶正電離子同時受到帶正電尖端186的排斥且受到帶負電擷取器190的吸收，因此帶正電離子係從尖端186引導至離子光學130中作為離子束192。抑制器188協助控制尖端186與擷取器190之間的總體電場，並因此控制從尖端186至離子光學130的帶正電離子之軌道。一般而言，可以調整尖端186與擷取器190之間的總體電場以控制在尖端頂點187處產生帶正電離子所採用的速率，以及將帶正電離子從尖端186傳輸至離子光學130所採用的效率。

舉例而言，在不希望受理論束縛的情況下，咸信可以如下產生氦離子。配置氣體場離子源120以便尖端頂點187附近的尖端186之電場超過未離子化氦氣體原子182之離子化場，並且將尖端186維持在相對較低的溫度。當未離子化氦氣體原子182係接近於尖端頂點187時，可以藉由尖端之電場來極化氦原子，從而在氦原子182與尖端頂點187之間產生弱吸收力。因此，氦原子182可接觸尖端頂點187並保持與其結合(例如實體吸附)達某時間。在尖端頂點187附近，電場係高到足以離子化吸附於尖端頂點187上的氦原子182，從而產生帶正電氦離子(例如採用離子束的形式)。

圖3為尖端頂點187(採用W(111)形成，參見以下說明)之示意表示。尖端頂點187包含配置成形成原子架的原子層。藉由原子142形成終端原子架。藉由原子144形成一第二原子架，並且藉由原子146形成一第三原子架。藉由氣

體來源110遞送的中性氣體原子182係出現在尖端頂點187附近。原子182由於尖端頂點187之電場而變得極化，並且經歷相對較弱的吸收力，其使原子182移動至尖端頂點187，如藉由原子182上的箭頭所指示。

根據尖端的電場之強度，尖端頂點187附近之原子架中的每個原子可以具有對應的離子化圓盤148。離子化圓盤148為一空間之區域，闖入其中的中性氦原子具有經歷離子化的高或然率。通常而言，中性氦原子的離子化經由從中性氦原子至尖端頂點原子的電子穿隧而出現。離子化圓盤148因此表示產生氦離子的空間區域，並且氦離子從中顯現。

對於特定尖端頂點原子而言，離子化圓盤148的大小係取決於尖端頂點187的形狀及施加於尖端頂點187的電位。一般而言，氦原子的離子化可以出現在鄰近於尖端頂點187之空間區域中，其中局部電場超過氦原子的離子化電位。因此，對於施加於尖端頂點187的較大電位而言，許多尖端原子將具有離子化圓盤。另外，尖端頂點187附近的局部電場取決於尖端頂點187之形狀。對於相對較銳利之尖端頂點而言，尖端頂點187附近的局部電場將相對較高。對於相對較鈍之尖端頂點而言，即使尖端頂點187附近的局部電場仍將較小。

在圖3中，對應於尖端頂點187之個別原子的離子化圓盤148係在空間上彼此分離。在某些具體實施例中，若尖端頂點187之電場係足夠大，則自多個原子(例如原子142)的

離子化圓盤可以在空間上重疊，從而建立一較大離子化圓盤，其跨越最接近於多個尖端頂點原子的空間之區域。藉由減小尖端頂點187處的電場，可以減小藉由離子化圓盤148佔用的積體，並且可以實現圖3中描述的幾何結構，其中少數尖端頂點原子分別具有其自己的個別空間分離式離子化圓盤。在許多實例中，因為於使用離子源120期間並未輕易地改變尖端頂點187之形狀，所以通常藉由調整施加於尖端頂點187的電位而控制尖端頂點187附近的電場。

藉由進一步減小施加於尖端頂點187的電位，可以消除圖3中的離子化圓盤之某些。例如，尖端頂點187並非如在第二原子架原子144附近一樣銳利，並且藉由減小施加於尖端頂點187的電位，可以減小原子144附近的尖端頂點187之電場以便氦原子離子化並不隨此等區域中的高或然率而出現。因此，對應於原子144的離子化圓盤不會再出現。然而，終端架原子142附近的尖端頂點187之電場仍將高到足以引起氦原子離子化，並因此對應於原子142的離子化圓盤148會保持。藉由仔細地控制施加於尖端頂點187的電位，離子源120可以操作以便僅出現的離子化圓盤對應於終端架原子142，並且對應於終端架原子的離子圓盤係在空間上彼此分離。因此，經由特定終端架原子附近的離子化而產生在尖端頂點187附近得到離子化的氦原子。

中性氦原子182所具有的經歷離子化之或然率越高，則其保持在離子化圓盤148內的時間越長。藉由尖端頂點187之電場所引發的氦原子之極化(且此舉使得極化的氦原子

移動至尖端頂點187)進一步確保極化氫原子保持與尖端頂點187結合，從而增加氫原子182保持在離子化圓盤148內的時間之數量，並增加極化氫原子隨時間而離子化的或然率。

極化氫原子還可以沿尖端頂點187之表面從一個位置移動至另一位置。因為極化氫原子與尖端頂點187之間的吸收力取決於極化氫原子之位置處的尖端頂點187之電場的局部強度，所以極化氫原子的運動傾向於將原子傳輸至尖端186之尖端頂點187的端部(例如至終端架142)，此處局部電場係最高的。此極化氫原子的傳輸機制與對施加於尖端186的電位之控制組合(例如以確保對應於僅終端架原子142的離散離子化圓盤會出現)，可用於操作離子源120以便藉由氣體場離子源120產生一氫離子束192，其中經由氫氣體與終端架原子142之一的相互作用而產生該離子束中的個別氫離子。離子束192因此包含自終端架原子142之每個的複數個氫離子，其中每個氫離子可以歸因於終端架原子142之一處的離子化。

如以上所說明，一般而言，可以藉由改變施加於尖端頂點187的電位而修改離子化圓盤148之大小及形狀，並且可以使鄰近離子化圓盤148與適當較大的施加電位重疊，或藉由適當較小的施加電位使該等圓盤148在空間上保持彼此不同。通常而言，離子化圓盤148係與尖端原子142、144及146隔開接近0.4 nm之距離。對應於尖端原子的個別離子化圓盤通常具有接近0.02 nm之厚度，其係在沿接合

一給定圓盤及其對應原子之一線的方向所測量。離子化圓盤148通常具有接近對應原子的直徑之一直徑，其係在垂直於接合一給定圓盤及其對應原子之該線的方向上所測量。

圖4顯示尖端頂點187之操作組態，其中施加於尖端186的電位產生三個離子化圓盤148，每個圓盤對應於三個終端原子架原子142之一。一旦在尖端頂點187附近產生氦離子，則該等離子由於較大的正尖端電位而迅速地加速成遠離尖端。氦離子係沿複數個軌道而加速成遠離尖端頂點187。圖4顯示兩個此類軌道156。如圖4所描述，軌道156對應於中間終端架原子的半高全寬(FWHM)軌道分佈之左手及右手極限。同樣地，若軌道156係向後(例如沿線154)外推至中間終端架原子之位置，則該等軌道界定用於中間終端架原子的虛擬來源152。虛擬來源152的直徑係通常小於中間終端架原子的直徑，並可甚小於中間終端架原子的直徑(例如達2或更大的因數、3或更大的因數、5或更大的因數、10或更大的因數)。類似的考量適用於其他終端架原子，並且每個終端架原子具有一對應虛擬來源大小。

用於終端架原子的較小虛擬來源大小可以提供若干優點。例如，離子束192之較小虛擬來源大小及的離子化圓盤148(離子束192中的離子即起於該圓盤)之相對較小厚度可以協助確保離子束192具有相對較高的亮度及相對較窄的離子能量分佈。

在不希望受理論的束縛的情況下，咸信使用太低的尖端

溫度可以不利地影響電流穩定性及/或增加自尖端上增加的雜質吸收之不合需要的效應。一般而言，尖端186的溫度係5 K或更高(例如10 K或更高、25 K或更高、50 K或更高、75 K或更高)，及/或100 K或更低(例如90 K或更低、80 K或更低)。例如，尖端186的溫度可以從5 K至100 K(例如從25 K至90 K、從50 K至90 K、從75 K至80 K)。可以藉由與冷卻劑(例如液態氦或液態氮)的熱耦合獲得尖端186之溫度。或者或另外可以使用低溫冷凍機對尖端186進行熱冷卻。

咸信若尖端186的溫度係太低，則減小藉由將吸收的氦原子移動至尖端頂點187之終端原子架中的原子142而傳輸該等氦原子所採用的速率，以便每單位時間沒有足夠的氦原子到達其中該等離子可以得到離子化的原子142。因此，當觀察尖端186之發射圖案(例如藉由使用場離子顯微鏡(FIM)技術、或藉由掃描FIM(SFIM)技術)時，自個別終端架原子的離子之豐度從相對較高豐度變為相對較低豐度(共同稱為閃光)。此可能出現於(例如)某些時間不存在可用於終端架原子附近的離子化之氦原子的情況下。隨著尖端186之溫度的增加，氦原子至尖端頂點187之原子之終端架的傳輸速率會增加，並且減少或消除自終端架原子142之此交變高/低豐度的觀察。

亦咸信若尖端186之溫度係太高，則極化氦原子將具有太大動能以保持與尖端186的結合達足夠長的時間週期以確保終端架原子142附近的氦原子之有效率的離子化。此

舉亦可以導致自個別終端架原子的發射圖案之消失，如使用FIM及/或SFIM成像技術所觀察。因此，為確保終端架原142之氦離子化程序產生自終端架原子142之每個的穩定離子電流，仔細地控制尖端186之溫度以減輕不合需要的高與低溫度效應。

一般而言，離子光學130係配置成將離子束192引導至樣本180之表面181上。如以下更詳細地說明，離子光學130可以(例如)聚焦、校準、偏轉、加速、及/或減速離子束192中的離子。離子光學130還可以使離子束192中的離子之僅一部分可穿過離子光學130。一般而言，離子光學130包含各種靜電及按需要配置的其他離子光學元件。藉由操縱離子光學130中的一或多個組件(例如靜電偏轉器)之電場強度，可以橫跨樣本180之表面181掃描氦離子束192。例如，離子光學130可以包含兩個偏轉器，其在兩個垂直方向上偏轉離子束192。偏轉器可以具有變動電場強度以便橫跨表面181之區域而光柵掃描離子束192。

當離子束192撞擊在樣本180上時，可以產生各種不同類型的粒子194。此等粒子包含(例如)二次電子、歐傑電子、二次離子、二次中性粒子、一次中性粒子、散射離子與光子(例如X射線光子、IR光子、可見光子、UV光子)。偵測器150與160係固定並配置成分別測量由氦離子束192與樣本180之間的相互作用所產生的一或多種不同類型之粒子。如圖1所示，將偵測器150固定成偵測主要起源於樣本180之表面181的粒子194，並且將偵測器160固定成偵測主

要從樣本180之表面183顯現的粒子194(例如發送的粒子)。如以下更詳細地說明，一般而言，在此處所揭示的顯微鏡系統可以使用任何數量與組態的偵測器。在某些具體實施例中，使用多個偵測器，並且將該多個偵測器之某些配置成測量不同類型的粒子。在某些具體實施例中，偵測器係配置成提供關於相同類型粒子的不同資訊(例如粒子之能量、給定粒子之角度分佈、給定粒子之總豐度)。可視需要地，可以使用此類偵測器配置的組合。

一般而言，將藉由偵測器測量的資訊用於決定關於樣本180的資訊。關於樣本180的示範性資訊包含關於表面181的地形資訊、(表面181及/或樣本180之次表面區域的)材料組分資訊、樣本180之結晶定位資訊、關於表面181之電壓對比度資訊(及因此其電性特性)、關於樣本180的次表面區域之電壓對比度資訊、樣本180之光學特性、及/或樣本180之磁性特性。通常而言，藉由獲得樣本180之一或多個影像而決定此資訊。藉由橫跨表面181而光柵掃描離子束192，可以在離散步驟中獲得關於樣本180的逐個像素資訊。偵測器150及160可加以配置成偵測每個像素中一或多種類型的粒子194。通常而言，像素為正方形，雖然在某些具體實施例中，像素可以具有不同形狀(例如矩形)。對應於像素之側面的長度之像素大小可以係(例如)從100 pm至2 μm(例如從1 nm至1 μm)。在某些具體實施例中，鄰近像素之位置可以決定係在至少200 pm內(例如在至少100 pm內、在至少75 pm內、在至少50 pm內)。因此系統之操

作者可以決定束光點的中心之位置係在至少200 pm內(例如在至少100 pm內、在至少75 pm內、在至少50 pm內)。在某些具體實施例中，樣本180的視場(FOV)係200 nm或更大(例如500 nm或更大、1 μm或更大、50 μm或更大、100 μm或更大、500 μm或更大、1 mm或更大、1.5 mm或更大)，及/或25 mm或更小(15 mm或更小、10 mm或更小、5 mm或更小)。視場指藉由離子顯微鏡所成像的樣本表面之面積。

通常經由電子控制系統170控制顯微鏡系統100之操作。例如，電子控制系統170可加以配置成控制藉由氣體來源110供應的氣體、尖端186之溫度、尖端186之電位、擷取器190之電位、抑制器188之電位、離子光學130的組件之設定、樣本操縱器140之位置、及/或偵測器150與160之位置。可視需要地，可手動控制此等參數之一或多個(例如經由與電子控制系統170整合的使用者介面)。或者或另外，可以使用電子控制系統170(例如經由諸如電腦之電子處理器)以分析藉由偵測器150與160收集的資訊並提供關於樣本180的資訊(例如地形資訊、材料組分資訊、結晶資訊、電壓對比度資訊、光學特性資訊、磁性資訊)，其可視需要地採用影像、曲線、表格、電子資料表等的形式。通常而言，電子控制系統170包含一使用者介面，其特徵為顯示器或其他種類的輸出器件、輸入器件與儲存媒體。

氦離子顯微鏡系統

A.概覽

圖5顯示一氦離子顯微鏡系統200之示意圖。顯微鏡系統200包含密封氦離子源及離子光學130的第一真空外罩202，與密封樣本180及偵測器150與160的第二真空外罩204。氣體來源110透過遞送管228將氦氣體遞送至顯微鏡系統200。流量調節器230控制透過遞送管228的氦氣體之流量，並且溫度控制器232控制氣體來源110中氦氣體之溫度。氦離子源包含附於尖端操縱器208的尖端186。氦離子源亦包含配置成將氦離子從尖端186引導至離子光學130中的擷取器190與抑制器188。離子光學130包含第一透鏡216、對準偏轉器220與222、孔徑224、像散校正器218、掃描偏轉器219與221以及第二透鏡226。將孔徑224固定在孔徑底板234中。將樣本180安裝在第二真空外罩204內的樣本操縱器140中/上。亦固定在第二真空外罩204內的偵測器150與160係配置成偵測自樣本180的粒子194。通常藉由電子控制系統170控制氣體來源110、尖端操縱器208、擷取器190、抑制器188、第一透鏡216、對準偏轉器220與222、孔徑底板234、像散校正器218、掃描偏轉器219與221、樣本操縱器140及/或偵測器150及/或160。可視需要地，電子控制系統170亦控制真空幫浦236與237，其係配置成提供真空外罩202與204內以及離子光學130內的減小壓力環境。

B.離子源

如上所述，一般而言，尖端186可以採用任何適當的導電材料形成。在某些具體實施例中，尖端186可以採用單

晶材料(例如單晶金屬)形成。通常而言，將尖端頂點187之原子的終端架之特定單晶定位與尖端186之縱向軸線對準在3°或更小內(例如在2°或更小內、在1°或更小內)。在某些具體實施例中，尖端186之頂點187可以在具有某一數目原子(例如20個原子或更少、15個原子或更少、10個原子或更少、9個原子或更少、6個原子或更少、3個原子或更少)之原子架中終止。例如，尖端186之頂點187可以採用W(111)形成並可以具有終端架，其具有三個原子(三聚物)。圖6與7分別顯示離尖端之頂點最近的一W尖端186之兩個原子架的放大俯視圖與側視圖之示意表示。包含配置在三聚物中的三個W原子302之終端架對應於W之(111)表面。在不希望受理論束縛的情況下，咸信此三聚物表面係有利的(根據其形成、重新形成的輕易性及穩定性)，因為W(111)晶體表面之表面能量有利地支撐藉由配置成等邊三角形以形成三聚物之三個W原子形成的終端架。藉由W原子304之第二終端架支撐三聚物原子302。

在某些具體實施例中，尖端186可以具有包含少於三個原子或多於三個原子的終端架。例如，W(111)尖端可以具有包含兩個原子的終端架，或包含僅一個原子的終端架。或者，W(111)尖端可以具有包含四個或更多原子(例如五個或更多原子、六個或更多原子、七個或更多原子、八個或更多原子、九個或更多原子、十個或更多原子、十個以上原子)的終端架。

或者或另外，對應於其他W結晶定位(例如W(112)、

W(110)或W(100))的尖端可加以使用，並且此類尖端可以具有包含一或多個原子(例如二個或更多原子、三個或更多原子、四個或更多原子、五個或更多原子、六個或更多原子、七個或更多原子、八個或更多原子、九個或更多原子、十個或更多原子、十個以上原子)的終端架。

在某些具體實施例中，可以在離子源中使用採用除單晶W以外的材料(例如金屬之單晶，如上述金屬之一之單晶)形成的尖端，並且此類尖端可以具有包含一或多個原子(例如二個或更多原子、三個或更多原子、四個或更多原子、五個或更多原子、六個或更多原子、七個或更多原子、八個或更多原子、九個或更多原子、十個或更多原子、十個以上原子)的終端架。

如以下所說明，尖端頂點187之形狀可以對離子束之品質產生影響，而該品質可以對顯微鏡系統200之性能產生影響。例如，當從側面觀察時，尖端頂點187可以係關於其縱向軸線而對稱地形成，或者該尖端頂點可以係關於其縱向軸線而不對稱地形成。在某些具體實施例中，從一或多個側視圖看，尖端頂點187可以係關於其縱向軸線而對稱地形成，並且從一或多個不同側視圖看，尖端頂點187可以係關於其縱向軸線而不對稱地形成。圖8顯示一示範性尖端300(採用的放大倍率甚小於圖6與7中的放大倍率)之側視圖，該尖端係針對其縱向軸線308而不對稱地形成。從給定的側視圖看，可以使用參數(例如平均全錐角及平均錐角方向)來量化沿縱向軸線308而不對稱地形成尖端

300所達到的程度。如下決定此等參數。

使用掃描電子顯微鏡(SEM)獲得尖端300之影像。圖8為此影像之示意表示。尖端300包含皆定位在縱向軸線308上的頂點310與第二點312，其中點312係沿縱向軸線308與頂點310隔開一個μm。影像線314垂直於軸線308而延伸並且穿過圖8之平面中的點312。線314在點316及318處與尖端300之輪廓交叉。左錐角θ_l係點316處的尖端300之輪廓的切線與線320(穿過點316且平行於軸線308而延伸的影像線)之間的角度。同樣地，右錐角θ_r係點318處的尖端300之輪廓的切線與線322(穿過點318且平行於軸線308而延伸的影像線)之間的角度。尖端300的全錐角係θ_l與θ_r之大小的總和。例如，對於給定的側視圖而言，在θ_l之大小係21.3°並且θ_r之大小係11.6°的具體實施例中，針對該側視圖，用於尖端300之輪廓的全錐角係32.9°。因為尖端300可以在一個側視圖中出現為對稱並且在一不同側視圖中出現為不對稱，所以一般需要決定用於尖端300的平均全錐角。藉由下列方式決定平均全錐角：測量用於尖端300之八個不同側視圖的全錐角(每個側視圖對應於尖端300針對先前尖端300之側視圖關於軸線308連續旋轉45°)，並接著計算如此決定的八個全錐角之平均值，從而產生平均全錐角。在不希望受理論束縛的情況下，咸信若平均全錐角係太小，則電弧可能出現在尖端的使用期間(例如當將尖端300用於產生離子束192時)，並且經由氫原子與除尖端之終端架上的尖端原子以外的尖端原子相互作用而產生氫離子的情況可

能由於尖端300附近的較大電場而出現。亦咸信若平均全錐角係太大，則可以減小以可再生方式重建尖端300的能力，並且尖端300附近的電場可以係太低以致無法可靠地離子化氦原子並產生穩定的氦離子電流。在某些具體實施例中，尖端300之平均全錐角可以係45°或更小(例如42°或更小、40°或更小、35°或更小、32°或更小、31°或更小)，及/或平均全錐角可以係15°或更大(例如20°或更大、23°或更大、25°或更大、28°或更大、29°或更大)。例如，尖端300之平均全錐角可以係27°至33°(例如從28°至32°、從29°至31°、30°)。在某些具體實施例中，八個全錐角測量之標準偏差係平均全錐角的40%或更小(例如30%或更小、20%或更小、10%或更小)。

錐角方向係θ_l與θ_r的大小之間的差異之絕對值的一半。因此，例如對於給定的側視圖而言，在θ_l之大小係21.3°並且θ_r之大小係11.6°的具體實施例中，錐角方向係0.5*|21.3°-11.6°|或4.9°。對於以上針對平均全錐角所說明的相同原因，可能需要決定尖端之平均錐角方向。藉由下列方式決定平均錐角方向：測量用於尖端300之八個不同側視圖的錐角方向(每個側視圖對應於尖端300針對先前視圖關於軸線308連續旋轉45°)，並接著計算八個錐角方向測量之平均值，從而產生平均錐角方向。在某些具體實施例中，尖端300之平均錐角方向可以係10°或更小(例如9°或更小、8°或更小、7°或更小、6°或更小、5°或更小)，及/或尖端300之平均錐角方向可以係0°或更大(例如1°或更大、

2°或更大、3°或更大、4°或更大)。在某些具體實施例中，尖端300之平均錐角方向可以係從0°至10°(例如從1°至10°、從3°至10°、從6°至10°、從2°至8°、從4°至6°)。

尖端300的特徵亦為其曲率半徑，其可以如下加以決定。圖9顯示尖端300之示意側視圖。實務上，使用SEM獲得此側視圖。在縱向軸線308之任一側上，測量尖端300之輪廓的斜率。點324與326係離頂點310最近的尖端300之表面上的點，其中尖端300之輪廓的斜率(分別藉由切線328與330指示)分別具有1與-1的數值(例如45°斜線)。點324與軸線308之間的距離(垂直於軸線308所測量並在圖9之平面中)係尖端300之左切線距離T_l。點326與軸線308之間的距離(垂直於軸線308所測量並在圖9之平面中)係尖端300之右切線距離T_l。將左半徑R_l計算為$R_l=\sqrt{2}\cdot T_l$，並將右半徑R_r計算為$R_r=\sqrt{2}\cdot T_r$。將尖端300之曲率半徑R計算為R_l與R_r之平均值。因此，例如在T_l係120 nm並且T_r係43 nm的具體實施例中，R_l係169 nm，R_r係61 nm，以及R係115 nm。對於以上針對平均全錐角及平均錐角方向所說明的相同原因，可能需要決定尖端之平均曲率半徑。藉由下列方式決定平均錐角方向：測量用於尖端300之八個不同側視圖的曲率半徑(每個側視圖對應於尖端300針對先前側視圖關於軸線308連續旋轉45°)，並接著計算八個曲率半徑之平均值，從而產生平均曲率半徑。在不希望受理論束縛的情況下，咸信若曲率半徑係太小，則電弧可能出現在尖端使用期間及/或氦氣體之離子化可能出現在除尖端之終端原子

架上的尖端原子以外的尖端原子附近。若平均曲率半徑係太大，則可以減小以可再生方式重建尖端的能力，並且由於尖端300附近的較低場強度而可以減小尖端300附近的氦原子之離子化的速率。在某些具體實施例中，尖端300之平均曲率半徑係200 nm或更小(例如180 nm或更小、170 nm或更小、160 nm或更小、150 nm或更小、140 nm或更小、130 nm或更小)，及/或尖端300之平均曲率半徑係40 nm或更大(例如50 nm或更大、60 nm或更大、70 nm或更大、80 nm或更大、90 nm或更大、100 nm或更大、110 nm或更大)。例如，在某些具體實施例中，尖端300之平均曲率半徑係從40 nm至200 nm(例如從50 nm至190 nm、從60 nm至180 nm、從70 nm至170 nm、從80 nm至160 nm)。在某些具體實施例中，八個曲率半徑測量之標準偏差係平均曲率半徑的40%或更小(例如30%或更小、20%或更小、10%或更小)。

圖10為製造具有係一三聚物的終端原子架之W(111)尖端的程序400之流程圖。在第一步驟402中，將單晶W(111)先驅線路附於支撐裝配件。通常而言，W(111)先驅線路具有3 mm或更小(例如2 mm或更小、1 mm或更小)，及/或0.2 mm或更大(例如0.3 mm或更大、0.5 mm或更大)的直徑。在某些具體實施例中，W(111)先驅線路具有從0.2 mm至0.5 mm(例如從0.3 mm至0.4 mm、0.25 mm)的直徑。適當的先驅線路可從(例如) FEI Beam Technology公司(俄勒岡州的希爾斯伯勒市)獲得。

更一般而言，在某些具體實施例中，尖端先驅可以採用不同於線路的形式。例如，尖端先驅可以採用具有在結晶結構中終止的突出部分之導電材料形成。突出部分的終點可以係(例如)單晶結構，並且可以採用W(111)形成，或者在類似或不同晶體定位中採用另一材料形成。

圖11A與11B分別顯示支撐裝配件520之一具體實施例的透視圖與仰視圖。支撐裝配件520包含與支撐基座524連接的支撐柱子522a及522b。將柱子522a及522b與加熱器線路526a及526b連接，並將W(111)先驅線路528之長度與加熱器線路526a及526b連接(例如經由焊接)。柱子522a及522b可與輔助器件(例如電流來源(如電源供應))連接以允許控制W(111)先驅線路528之溫度。

基座524提供用於裝置件520的機械支撐並一般係採用一或多種材料形成，該等材料可以經受溫度循環而且可以作為電性絕緣體。例如，在某些具體實施例中，基座524係採用電性絕緣材料(例如玻璃及/或剛性聚合物及/或陶瓷)形成。

柱子522a及522b係一般採用一或多種導電材料形成。通常而言，選擇用於形成柱子522a及522b的材料以便柱子522a及522b與基座524具有類似的熱膨脹係數，且以便柱子522a及522b在先驅線路528之溫度循環期間保持相對於基座524而固定在適當位置。在某些具體實施例中，柱子522a及522b係採用包含鐵、鎳及鈷之合金形成。可以形成柱子522a及522b採用的商用材料之一範例係KOVAR™。

一般而言，加熱器線路526a及526b係採用具有高於先驅線路528之電阻率的一或多種材料形成。例如，在某些具體實施例中，加熱器線路526a及526b可以採用諸如鎢錸合金之材料形成。如以下所述，加熱器線路526a及526b在電流(例如自外部電源供應)穿過該等線路時產生熱，並且可以將該熱用於在各尖端處理步驟期間增加及/或控制先驅線路528之溫度。一般而言，選擇加熱器線路526a及526b的直徑及材料以確保可以在製造程序期間達到對先驅線路528之溫度的適當控制。在某些具體實施例中，加熱器線路526a及526b具有(例如)從100 μm至750 μm的直徑。

一般可以按需要選擇基座524、柱子522a及522b與加熱器線路526a及526b之幾何特性。例如，在某些具體實施例中，柱子522a與522b之間的距離可以從1 mm至10 mm。

可視需要地，可以將兩個以上的柱子(例如三個柱子、四個柱子、五個柱子、六個柱子)附於基座524，其中透過對應的加熱器線路將每個柱子與先驅線路528連接。提供額外柱子可增加裝配件520之穩定性及/或減小裝配件520對機械振動的易感性。

在某些具體實施例中，先驅線路528可藉由施加壓縮力於該線路的支撐裝配件而加以固持在適當位置。例如，圖12顯示包含用於緊固先驅線路528的Vogel底板之示範性支撐裝配件550。例如，適當的Vogel底板係以商業方式從AP Tech公司(俄勒岡州的麥克明維爾市)購得。支撐裝配件550包含支撐基座556及附於基座556的安裝臂552。為緊固先

驅線路528，將安裝臂552撬開並將間隔件(例如採用熱解碳形成)554插入該等安裝臂之間的空間中。接著將先驅線路528插入間隔件554之間的開口中，並再接著鬆開安裝臂552。由於臂552之彈性，該等臂在藉由箭頭558及560指示的方向上將壓縮力施加於間隔件554及先驅線路528，從而緊靠間隔件554而緊固先驅線路528。線路528、間隔件554與臂552之間的靜態摩擦力阻礙此等組件的相對移動，從而確保線路528於支撐裝配件550中保持固定在適當位置。通常而言，線路528在臂552上延伸達(例如)1 mm與5 mm之間的距離。

基座556可以採用類似於可用於形成基座524的材料(例如玻璃及/或剛性聚合物及/或陶瓷)之材料形成。基座556之材料通常為電性絕緣材料，其可以經受溫度循環。

安裝臂552可以採用一或多種導電材料形成。可以選擇用於形成臂552的材料以便基座556及臂552具有類似的膨脹係數，且以便臂552在先驅線路528之溫度循環期間保持相對於基座556而固定在適當位置。在某些具體實施例中，臂552係採用包含鐵、鎳及鈷之合金形成。用於形成臂552的適當商用材料包含KOVAR™。

間隔件554係採用諸如熱解碳之材料形成。適當的熱解碳間隔件可以從(例如)AP Tech公司(俄勒岡州的麥克明維爾市)購得。熱解碳間隔件通常係採用一係列彼此堆疊的平坦碳片形成以建立薄片狀結構。一般而言，熱解碳之電阻率依據方向而變動，其中在垂直於各薄片之方向上(例

如在接近垂直於堆疊式薄片之平面的方向上)的碳之電阻率係高於沿平行於各薄片之平面之一平面中的方向之電阻率。在安裝期間，對間隔件554進行定向以便間隔件554之較高電阻率方向係接近平行於藉由臂552施加的壓縮力之方向(例如接近平行於箭頭558及560)。當將電流引入臂552中時，間隔件554由於其高電阻率而產生熱。因此，間隔件554可以用作用於調整先驅線路528之溫度的加熱元件。

再次參考圖10，在第二步驟404中，於電化學浴槽中蝕刻先驅線路528以使線路528之尖端成形。一般而言，步驟404包含多個子步驟。

蝕刻程序中的第一子步驟可以視需要為清理步驟以從線路528移除表面污染物。此蝕刻程序可以包含將線路528置放在一電化學蝕刻溶液中並將線路528曝露於交流(AC)電壓。例如，該溶液可以係氫氧化鈉(NaOH)之1 N溶液，並且可以使用1 V的交流電壓。隨後，可以清理(例如在水中進行超聲波清理)整個支撐裝配件(例如支撐裝配件520或550)以移除某些剩餘的污染物。

步驟404中的下一子步驟係視需要地施加光阻材料於線路528之一部分。通常而言，將光阻材料施加於從線路528之頂點開始接近線路528之0.5 mm的長度上。例如，可以藉由下列方式達到光阻材料的施加：將一滴光阻溶液放在乾淨表面上並將線路528浸入光阻中若干次，從而使光阻可在施加之間稍微變乾。所施加的光阻會限制在隨後的處理步驟期間得到蝕刻的先驅線路528之數量。因為在先驅

線路528上形成隨後的尖端之後通常藉由蝕刻來移除先前尖端，所以使用光阻材料使較大數目的尖端可形成於給定的先驅線路上，然後丟棄該線路。可以將各種不同的光阻材料施加於先驅線路528。一示範性光阻材料為化妝用的指甲油。在某些具體實施例中，可以使用多種光阻材料。使用光阻材料對於尖端形成程序而言係可選的，然而在某些具體實施例中，光阻材料於在製造程序經歷隨後的步驟之後才可施加於先驅線路528。

步驟404中的下一子步驟係電化學蝕刻先驅線路528。可以使用各種電化學蝕刻程序。在某些具體實施例，使用下列電化學蝕刻程序。將支撐裝配件放置於一蝕刻固定件中，該固定件包含用於轉移支撐裝配件的一轉移裝置、一圓盤及延伸至該圓盤中的一電極(例如不銹鋼電極)。將蝕刻溶液放置在該圓盤中以便溶液與該電極接觸。經由該轉移裝置朝圓盤降落支撐裝配件，直至線路528上的光阻介面正好接觸蝕刻溶液。接著降落線路528達額外數量(例如0.2 mm)至蝕刻溶液中。

蝕刻溶液包含化學腐蝕線路528的一組分(例如NaOH)。在蝕刻溶液包含NaOH的具體實施例中，可以選擇蝕刻溶液中的NaOH之濃度以改變先驅線路528之腐蝕速率及溶液之化學環境。例如，在某些具體實施例中，NaOH之濃度可以係0.1 M或更大(例如0.2 M或更大、0.5 M或更大、0.6 M或更大、0.8 M或更大、1.0 M或更大、1.2 M或更大、1.4 M或更大、1.6 M或更大、2.0 M或更大、2.5 M或更

大、3.0 M或更大)，及/或10.0 M或更小(例如9.0 M或更小、8.0 M或更小、7.0 M或更小、6.5 M或更小、6.0 M或更小、5.5 M或更小、5.0 M或更小、4.5 M或更小、4.0 M或更小)。在某些具體實施例中，NaOH之濃度可以係從0.5 M至10.0 M(例如從1.0 M至9.0 M、從1.5 M至8.0 M、從2.0 M至7.0 M、從2.0 M至6.0 M、從2.0 M至3.0 M)。

在某些具體實施例中，為替代NaOH或除其以外，可以將其他腐蝕劑添加至蝕刻溶液中。此類腐蝕劑之範例包含KOH(包含熔化的KOH)、HCl、H_3PO_4、H_2SO_4、KCN、及/或熔化的$NaNO_3$。蝕刻溶液中的腐蝕劑可根據其腐蝕採用特定類型的材料形成之先驅線路的能力來加以選擇。例如，可以將諸如NaOH之腐蝕劑用於腐蝕採用W形成的線路。對於採用不同材料(例如Ir)形成的線路而言，可以在蝕刻溶液中使用其他腐蝕劑。

在某些具體實施例中，蝕刻溶液可以包含相對較小數量的表面活性劑。在不希望受理論束縛的情況下，咸信表面活性劑可以協助促進先驅線路528之對稱蝕刻。用於此目之適當的表面活性劑包含可從伊士曼柯達公司(紐約羅徹斯特)購得之材料，例如PhotoFlo 200。一般而言，蝕刻溶液中的表面活性劑之濃度係0.1體積%或更大(例如0.2體積%或更大、0.3體積%或更大、0.4體積%或更大)，及/或2體積%或更小(例如1體積%或更小、0.8體積%或更小、0.6體積%或更小)。

在某些具體實施例中，還可以隨著蝕刻溶液的攪拌而執

行蝕刻程序。可以根據蝕刻程序的結果來憑經驗決定攪拌蝕刻溶液所採用的速率。

在將先驅線路528固定在蝕刻溶液中之後，將外部電源供應與線路528及電極連接，並且橫跨線路528及電極而施加電位以便於線路528之電化學腐蝕反應。一般而言，可以從交流來源或直流(DC)來源施加電壓。一般可以根據憑經驗決定產生均勻蝕刻的先驅線路528之電壓幅度來按需要選擇施加的電壓之幅度。例如，在某些具體實施例中，施加的電位之幅度係3.0 V或更大(例如3.2 V或更大、3.5 V或更大、4.0 V或更大、5.0 V或更大、10 V或更大、15 V或更大、20 V或更大)，及/或50 V或更小(例如40 V或更小、35 V或更小、30 V或更小、25 V或更小)。在某些具體實施例中，施加的電位之幅度係在3.0 V與50 V之間(例如從3.5 V至40 V、從4.0 V至30 V、從4.5 V至20 V)。

施加於蝕刻溶液的交流脈衝之持續時間可以一般按需要變動以促進線路528之受控蝕刻。例如，在某些具體實施例中，施加於蝕刻溶液的脈衝具有10 ms或更長(例如25 ms或更長、50 ms或更長、75 ms或更長、100 ms或更長、150 ms或更長、200 ms或更長、250 ms或更長)，及/或一秒或更短(例如900 ms或更短、800 ms或更短、700 ms或更短、650 ms或更短、600 ms或更短)的持續時間。在某些具體實施例中，施加於蝕刻溶液的脈衝具有從10 ms至一秒(例如從10 ms至900 ms、從10 ms至800 ms、從10 ms至700 ms、從10 ms至600 ms)的持續時間。

一般而言，可以將變動持續時間及/或幅度之脈衝施加於蝕刻溶液以在接觸溶液的線路之區域中引起先驅線路528之腐蝕。通常而言，在處理期間，先驅線路528之端部的一部分掉入蝕刻溶液中，並且在隨後的步驟中進一步處理先驅線路528之新近曝露的蝕刻區域。例如，適當的蝕刻範圍包含初始施加幅度5 V之接近100個交流脈衝，每個脈衝具有接近580 ms的持續時間。然後，施加一係列接近60個脈衝，每個脈衝具有接近325 ms的持續時間及5 V之幅度。接著，施加具有35 ms的持續時間及5 V之幅度的脈衝，直至線路528之端部的一部分掉入蝕刻溶液中。

在將電性脈衝施加於蝕刻溶液期間，可以調整先驅線路528之浸沒深度。通常而言，蝕刻程序會導致形成先驅線路528之一窄直徑區域。調整線路528之浸沒深度可以有助於確保將蝕刻溶液之彎月面固定在窄直徑區域之一中間點附近，此可以增強形成相對對稱尖端的或然率。隨著接近掉落點(例如隨著窄直徑區域中的直徑變為很小)，執行浸沒深度調整以確保先驅線路528之端部不會急速斷開。在先驅線路528之端部掉落之後，於蝕刻溶液中很稍微地浸沒線路528之新近曝露的尖端，並且施加額外電性脈衝。在某些具體實施例中，施加兩個電性脈衝。舉例而言，第一脈衝可以係從1 V至10 V(例如從3 V至7 V、5 V)，該脈衝具有從20 ms至50 ms(例如從30 ms至40 ms、35 ms)的持續時間，並且第二脈衝可以係從1 V至10 V(例如從3 V至7 V、5 V)，該脈衝具有從10 ms至25 ms(例如從15 ms至20

ms、17 ms)的持續時間。

支撐裝配件接著從蝕刻固定件加以移除、沖洗(例如採用蒸餾或去離子水)並烘乾(例如在乾燥氮氣體流的條件下)。

程序400之下一步驟406係檢查支撐裝配件(且特定言之，為線路528之蝕刻尖端)以確認蝕刻尖端具有適當的幾何特徵。如先前所說明，例如幾何特徵之決定包含獲得蝕刻尖端之輪廓影像並從自輪廓影像獲得之資料計算各幾何參數。例如，可使用SEM執行檢驗。可以採用很高的放大倍率(例如65,000 X之放大倍率)獲得線路528的尖端之輪廓影像。所測量的幾何參數可以包含(例如)平均尖端曲率半徑、平均錐角方向及平均全錐角。在此情況下，若蝕刻尖端之形狀係不適合的，則可以藉由將裝配件插回至蝕刻固定件並朝圓盤降落線路528之蝕刻尖端直至尖端正好接觸蝕刻溶液而稍微使尖端重新成形。可以將少數電性脈衝(例如從持續時間35 ms及幅度5 V之一至三個脈衝)用於使線路528之尖端重新成形。例如，若線路528的尖端之平均全錐角係太小，則可以將少數較短持續時間脈衝用於增加平均全錐角而不實質上增加蝕刻尖端之平均半徑。在施加此等額外電性脈衝之後，接著可以在SEM中重新檢查尖端以確認已使尖端正確地重新成形。

隨後，在步驟408中，將蝕刻線路528之尖端之頂點的終端架形成於三聚物中。此程序一般包含使尖端成像(例如使用FIM或SFIM)並使尖端成形(例如使用場蒸發)。

在某些具體實施例中，步驟408包含將支撐裝配件安裝在FIM中並抽空FIM。冷卻線路528之尖端(例如至液態氦溫度)，並將氦氣體供應給FIM(例如接近5×10^{-6} Torr的壓力下)。將針對擷取器的正電位(例如相對於擷取器的5 kV或更高)施加於線路528之尖端，並且氦原子與線路528之尖端之頂點相互作用以形成氦離子。氦離子係加速成遠離線路528之尖端的帶正電頂點。一偵測器(例如與二維成像器件(如CCD相機)光學耦合的磷光體螢幕)係固定在與離子源的一選擇距離處，並且定向成接近垂直於自離子源的主離子束軌道。撞擊離子可以使磷光體螢幕發射光子，其係藉由CCD相機所偵測。對應於相對較大數目之偵測離子的影像之區域將出現為比對應於相對較少數目之偵測離子的區域明亮。氦氣體原子之離子化出現在線路528之尖端之頂點處的個別離子源附近。因此，藉由偵測器捕獲的影像對應於離子源之發射圖案。更特定言之，從偵測器獲得之影像中的明亮光點對應於離子源頂點處的個別原子。因此，FIM影像為得到原子分解的線路528之尖端之頂點的影像。根據FIM影像，可以決定離子源頂點處的原子之晶體結構、定位及特定配置。

若線路528之尖端之頂點的所需特性並未出現，則可以使用(例如)場蒸發使尖端成形。在場蒸發期間，於線路528之蝕刻尖端的影像係聚焦在FIM偵測器上並且氦氣體之背景壓力仍出現在FIM中的情況下，增加尖端上的正電位(例如相對於擷取器的15 kV或更大)，直至所獲得的電場開始

從尖端上局部電場係最高的位置移除W原子(及污染原子)。控制移除原子所採用的速率以防止原子群組同時得到移除。一般而言，場蒸發隨監視FIM發射圖案而繼續，直至確認蝕刻尖端之表面係在正確的晶體定位上，並且決定在尖端之終端架處不存在不合需要的污染物。

在場蒸發之後，可能需要銳化尖端。為銳化尖端，從FIM反應室中用幫浦排出氦氣體，並且將線路528之尖端上的偏壓改變為針對共同接地之負偏壓以便線路528之尖端之頂點發射電子。產生光子以回應入射電子的偵測器(例如磷光體塗層玻璃螢幕)係固定成截取自尖端的電子。產生的光子係藉由適當的偵測器(例如CCD器件、光電倍增管、光二極體或另一類型的光子偵測器)所偵測並用於監視自尖端的電子發射。在某些具體實施例，可以將偵測器與光子產生器件直接耦合。在某些具體實施例中，並非直接耦合偵測器與光子產生器件。例如，光學元件(例如反射鏡)可以用於將產生的光子引導至偵測器。

調整施加於尖端的電壓偏壓，直至測量所需的電子電流(例如從25 pA至75 pA、從40 pA至60 pA、50 pA)。接著將尖端加熱至所需溫度(例如從1000 K至1700 K、從1300 K至1600 K、1500 K)，並且以視覺方式監視尖端來偵測從尖端發射的光以回應電壓與熱的施加。例如，可以藉由下列方式監視自尖端的發光：使用一反射鏡，其係固定成將藉由尖端發射的光朝適當的光子偵測器(例如CCD器件、光電倍增管、光二極體或另一類型的光子偵測器)反射。

可以使用各種器件(例如電阻加熱器件(如燈絲加熱器)、輻射加熱器件、引發性加熱器件或電子束)將熱施加於尖端。在首次出現自尖端的光之後從15秒至45秒(例如從25秒至35秒、30秒),關閉施加的電位與加熱器件,從而產生線路528,其具有作其終端原子架的三聚物。

可視需要地,可以將一氣體用於銳化尖端。例如,可以將氧化引入FIM反應室以促進圓形W尖端表面之銳化。在已從FIM反應室移除氦之後引入銳化氣體(例如氧氣),並且於選擇的壓力及出現氧氣的情況下對尖端進行加熱達一時間週期。例如,為銳化圓形W尖端,首先從FIM反應室用幫浦排出氦並接著將尖端加熱至1300 K與1700 K之間(例如1500 K)之溫度。於一分鐘與五分鐘之間將尖端維持在1500 K。接著,可以在接近10^{-5} Torr的壓力情況下將氧化引入反應室,同時維持該溫度達接近兩分鐘。在氧氣繼續流入反應室的情況下,接著將尖端之溫度減小至700 K與1200 K之間(例如1000 K),並且將尖端維持在該溫度達接近兩分鐘。最終,關閉至反應室氧氧氣供應並且從反應室用幫浦排出氧氣,直至其中的氧氣壓力係小於10^{-7} Torr。同時,將尖端冷卻至其正常操作溫度(例如在某些具體實施例中接近77 K),並且將氦重新引入至FIM反應室。當在FIM模式使尖端成像時,可觀察尖端頂上的W三聚物,其對應於W(111)刻面。具有係三聚物的終端架之W(111)線路接著可以從FIM移除並儲存以備將來使用。

雖然上文說明將從系統200分離的FIM用於使線路尖端

頂點成像/成形的具體實施例，但是在某些具體實施例中，可以將系統200用作FIM。在此類具體實施例中，一般依據先前段落中說明的程序將支撐裝配件安裝在離子源中並將系統200操作為FIM。在某些具體實施例中，當於FIM模式中操作系統200時，可以在通常固定樣本280的任何處固定偵測器(即，樣本180並非出現在其正常位置)。在某些具體實施例中，當於FIM模式中操作系統200時，可以在通常固定樣本180處固定具有相對較高二次電子產率的平坦樣本，並且偵測藉由氦離子與平坦樣本的相互作用所產生的二次電子，因為偵測的二次電子之強度將一般與入射在平坦樣本上的氦離子之強度成比例。

可視需要地，在使線路尖端頂點成像/成形的程序期間，於SFIM模式中操作系統200。在此類具體實施例中，程序係如先前段落所說明，下列情況除外：將對準偏轉器220及222用於橫跨孔徑224之表面而光柵掃描離子束以產生線路尖端之頂點的場發射圖案。穿過孔徑224的離子束之部分可以視需要地藉由第二透鏡226加以聚焦，或保持未聚焦。在SFIM模式中，逐個像素地獲取線路尖端之影像，並且每個測量的像素強度對應於得到允許穿過孔徑224的離子束之一部分。像素強度在一起可用於將尖端之場發射圖案表示為一影像，或更一般而言，表示為複數個電信號。接著可以將場發射圖案用於估定尖端之各種特性以決定其用於氣體場離子顯微鏡的適宜性。在SFIM模式中，偵測器可加以定位並係如先前段落中說明的類型。可

視需要地，偵測器可以係空間整合偵測器，例如光電倍增管或光二極體。

以上說明的程序一般可以用於首次銳化W尖端，並且還可以用於在離子顯微鏡系統內重新銳化一W尖端。此重新銳化可以在系統200中加以執行，即使在除系統200以外的一FIM中執行用於銳化該W尖端的初始程序亦如此。重新銳化可以一般採用如初始銳化的相同方式加以執行，或重新銳化技術可以不同於最初的銳化技術。在某些具體實施例中，為估定重新銳化是否需要，顯微鏡系統200可加以配置成在FIM及/或SFIM模式中操作，如以上所說明。根據尖端之一或多個影像，可以啟動或延遲重新銳化程序。在某些具體實施例中，可以將其他準則用於決定何時啟動重新銳化。例如，若在一操作週期之後自尖端的測量離子電流係降至所建立的臨界值以下，則可以啟動重新銳化。

作為重新銳化中的第一步驟，尖端可加以場蒸發以移除尖端頂點附近的原子。例如，顯微鏡系統200可加以配置成在FIM及/或SFIM模式中操作，如以上所說明，並且施加於尖端的電位可加以仔細地調整以產生尖端原子之受控場蒸發。在場蒸發程序期間，尖端之場發射影像可以在FIM或SFIM模式中藉由一偵測器(例如磷光體耦合光子偵測器，或配置成測量自平坦樣本的二次電子發射之二次電子偵測器)加以獲得並且監視以決定何時停止場蒸發程序。如上所述，當尖端之表面係在正確的晶體定位中並且係乾淨的時，可以重新銳化尖端。

從顯微鏡系統200採用幫浦排出氦氣體，直至背景氦壓力係低於接近10^{-7} Torr。在某些具體實施例中，為啟動重新銳化，將負電位施加於尖端以在電子模式中操作顯微鏡系統200，並且經由加熱來銳化尖端，如先前所說明。在某些具體實施例中，將諸如氧氣之銳化氣體引入顯微鏡系統200中，並且於出現氧氣的情況下對尖端進行加熱達一選擇時間，如先前所說明。於重新銳化程序之後，將氦氣體重新引入顯微鏡系統200，並且將系統配置成在FIM及/或SFIM模式中操作，捕獲重新銳化尖端之一或多個影像以確認尖端頂點包含對應於W(111)刻面的三聚物。

在某些具體實施例中，可以藉由電子控制系統170中的硬體及/或軟體而自動地執行某些重新銳化步驟。例如，在某些具體實施例中，可以採用自動化方式執行施加於圓形尖端的銳化程序。藉由電子控制系統170實施的銳化演算法之一範例係如下。首先，控制系統170藉由啟動幫浦236及/或237而抽空顯微鏡系統200並將尖端冷卻至液態氦溫度。當顯微鏡系統200中的氣體之背景壓力係小於建立的臨界值時，藉由將校準電流施加於支撐尖端的加熱器線路，由控制系統170將尖端加熱至1500 K的溫度。在1500 K情況下兩分鐘之後，控制系統170藉由開啟氧氣體來源上的閥門而將氧氣體引入顯微鏡系統200中。調整閥門開口以維持顯微鏡系統200中接近10^{-5} Torr的氧氣壓力。再過兩分鐘之後，藉由調節進入系統的液態氦冷卻劑之流量，由控制系統170將尖端之溫度減小至1100 K。在1100 K的情

況下兩分鐘之後，控制系統170關閉至系統的氧氣供應並將尖端冷卻至液態氮溫度。在此情況下，可以將尖端之FIM及/或SFIM影像(藉由操作者所測量)用於手動確認尖端之頂點處的W(111)之出現。

在不希望受理論束縛的情況下，咸信氧氣可以促進作為尖端之終端原子架的三聚物之形成。在某些具體實施例中，FIM反應室中的氧氣體之壓力可以係10^{-7} Torr或更大(例如10^{-6} Torr或更大、10^{-5} Torr或更大、10^{-4} Torr或更大)，及/或1 Torr或更小(例如10^{-1} Torr或更小、10^{-2} Torr或更小、10^{-3} Torr或更小)。在某些具體實施例中，FIM反應室中的氧氣體之壓力可以係從10^{-8} Torr至10^{-2} Torr(例如從10^{-7} Torr至10^{-3} Torr、從10^{-6} Torr至10^{-4} Torr)。亦可以將其他氣體與材料用於在尖端銳化期間促進作為終端原子架的三聚物之形成。例如，可以在重新銳化之前將諸如鈀、鉑、金及/或銥之材料汽相沉積於圓形尖端之表面上。咸信此等材料可以促進尖端之頂點處更可靠的三聚物形成。

在某些具體實施例中，可以藉由控制尖端之加熱而不施加電場或有意添加氧氣來達到W尖端之銳化。例如，可以藉由下列步驟銳化W尖端：1)在FIM反應室中安裝尖端；2)減小FIM反應室中的壓力；3)將尖端加熱至1000 K並保持該溫度五分鐘；以及冷卻(例如至液態氮溫度)。在不希望受理論束縛的情況下，咸信出現在尖端上的氧氣之跡線數量可協助使用熱來銳化尖端。在某些具體實施例中，未銳化尖端可曝露於氧氣流、放置在實質無氧氣環境中、以及

藉由受控加熱所銳化。咸信此方法可在尖端之表面上產生W氧化物，並且加熱後從W氧化物釋放的氧氣可協助尖端銳化程序。

在某些具體實施例中，一或多種額外氣體可在尖端銳化期間出現。例如，在某些具體實施例中，氮氣體可以出現。在不希望受理論束縛的情況下，咸信氮氣體可協助蝕刻尖端以為圓形結構提供係三聚物終端原子架，此結構係咸信比不圓的三聚物終止型尖端穩定。一般而言，與氧氣體同時引入氮氣體。在某些具體實施例，FIM反應室中的氮氣體之壓力可以係10^{-8} Torr或更大(例如10^{-7} Torr或更大)，及/或10^{-5} Torr或更小(例如10^{-6} Torr)。在某些具體實施例，FIM反應室中的氮氣體之壓力可以係從10^{-5} Torr至10^{-8} Torr(例如從10^{-6} Torr至10^{-7} Torr)。

可視需要地，在形成三聚物之後並為協助確保尖端銳化程序係可重複的，增加施加於銳利尖端的正電位以便尖端之受控場蒸發會出現。在場蒸發尖端達一時間週期之後，尖端頂點恢復圓形。通常而言，圓形尖端產生一發射圖案，其係類似於初始場蒸發步驟之後尖端的發射圖案。接著，在電子模式中再次銳化圓尖端以產生係三聚物的終端原子架(例如使用以上說明的程序)。在某些具體實施例中，為增加銳化尖端的使用壽命及穩定性，可以使用場蒸技術從銳化尖端移除一或多個三聚物。例如，可以移除藉由三原子架形成之銳化尖端上的最頂上原子層以揭露下面的原子架，其包含三個以上的原子。新近曝露的原子架可

進一步加以場蒸發以在其頂點處產生W原子三聚物。此新近形成三聚物連同在場蒸發期間形成的額外三聚物可加以蒸發。此程序導致尖端在其頂點附近逐層成圓形。藉由使尖端成圓形，可減小尖端頂點附近的電場梯度，從而減小於顯微鏡系統200係在操作的同時尖端原子經歷場蒸發的或然率，並增加尖端之穩定性及使用壽命。

在程序400之步驟410中，在系統200內對準尖端186之頂點187。在顯微鏡系統200中安裝支撐裝配件的情況下，使用一或多個真空幫浦抽空顯微鏡系統200，並接著將熱施加於尖端187以移除(例如)可能已黏著於尖端表面的氧化物、冷凝液、及/或任何其他雜質。通常而言，例如將尖端186加熱至900 K或更高(例如1000 K或更高、1100 K或更高)的溫度達10 s或更長(例如30 s或更長、60 s或更長)的持續時間。若藉由雜質的出現而使尖端形狀折衷，則加熱亦可協助重新刻畫尖端186。

在尖端186因施加的熱而輻射式發光之情況下，接著藉由觀察沿縱向軸線傳播的自尖端186之光而將尖端與離子光學130之縱向軸線粗略地對準(例如藉由插入諸如反射鏡之反射元件並將光之一部分引導至諸如CCD相機之偵測器)。可以藉由調整尖端操縱器208而改變尖端186之位置及/或定位以透過離子光學130從尖端186引導光。

在此粗略對準程序之後，顯微鏡系統200係配置成藉由下列方式在FIM或SFIM模式中操作：減小真空外罩202及204中的背景壓力、冷卻尖端186(例如至接近液態氮溫

度)、以及經由氣體來源110將氦氣體原子流引入尖端186附近的區域中。藉由適當配置的偵測器而測量自尖端186的氦離子之場發射圖案的一影像，且根據此影像，將尖端操縱器208用於將場發射圖案與離子光學130之縱向軸線對準，以便尖端186之場發射圖案係在縱向軸線上居中。可以藉由下列方式執行居中測試：改變施加於第一透鏡216的電位，同時觀察尖端186之場發射圖案的引發式調變。若藉由偵測器觀察的場發射圖案之大小由於施加於透鏡216的電位之變動而改變，但圖案之中心的位置並不改變，則將尖端186與第一透鏡216之縱向軸線對準。相反，若尖端186之場發射圖案的中心位置改變以回應施加於第一透鏡216的電位之變動，則尖端186並非在第一透鏡216之縱向軸線上居中。可以反覆重複經由尖端操縱器208而調整尖端186之定位及位置，直至將尖端186與第一透鏡216之縱向軸線足夠較佳地對準。通常而言，執行此居中測試而無需使孔徑224處於適當位置。

接著可執行精細對準程序以確保經由氦氣體原子與尖端186之頂點187處的三原子架之相互作用所產生的氦離子可穿過孔徑224。調整施加於偏轉器220及222的電位(見以下論述)，以便經由氦氣體原子與尖端186之頂點處的三個三聚物原子之僅一個原子的相互作用，產生離子束192中穿過孔徑224的氦離子之70%或更多(例如75%或更多、80%或更多、85%或更多、90%或更多、95%或更多、97%或更多、99%或更多)。同時，施加於偏轉器220及222的電位之

調整可確保孔徑224防止藉由氦氣體原子與其他兩個三聚物原子的相互作用所產生的離子束192中氦離子之50%或更多(例如60%或更多、70%或更多、80%或更多、90%或更多、95%或更多、98%或更多)到達樣本180之表面181。因為此精細對準程序，所以穿過孔徑224且退出離子光學130的氦離子束包含主要在尖端186之頂點處的三個三聚物原子之僅一個原子附近得以離子化的氦原子。

再次參考圖10，在將尖端186與第一透鏡216之縱向軸線對準並對準氦離子束以便離子束192之一部分穿過孔徑224的情況下，可以在程序400之步驟412中於氦離子模式中操作顯微鏡系統200。在尖端銳化期間於FIM模式中使用系統200的具體實施例中，移動FIM偵測器及/或其他FIM組件以便可固定樣本180以曝露於離子束192。將針對擷取器190的正電位施加於尖端186，並經由氣體來源110將氦氣體引入真空外罩202。經由氦氣體原子主要與尖端186之頂點處的三個三聚物原子之一個原子的相互作用所產生的氦離子係透過孔徑224藉由離子光學130所指導，並引導至樣本180。

在某些具體實施例中，施加於尖端186的電位係5 kV或更高(例如10 kV或更高、15 kV或更高、20 kV或更高)。在某些具體實施例中，施加於尖端186的電位係35 kV或更低(例如30 kV或更低、25 kV或更低)。例如，在某些具體實施例中，施加於尖端186的電位係從5 kV至35 kV(例如從10 kV至30 kV、從15 kV至25 kV)。

在某些具體實施例中，於顯微鏡系統200操作期間，氦氣體壓力係10^{-8} Torr或更大(例如10^{-7} Torr或更大、10^{-6} Torr或更大、10^{-5} Torr或更大)。在某些具體實施例中，顯微鏡系統200中的氦氣體壓力係10^{-1} Torr或更小(例如10^{-2} Torr或更小、10^{-3} Torr或更小、10^{-4} Torr或更小)。例如，在某些具體實施例中，顯微鏡系統200中的氦氣體壓力係從10^{-7} Torr至10^{-1} Torr(例如從10^{-6} Torr至10^{-2} Torr、從10^{-5} Torr至10^{-3} Torr)。

為確認尖端186的完整性，可以藉由在FIM或SFIM模式中操作顯微鏡系統200來週期性地監視自尖端186的場發射圖案，如以上所說明。若三聚物結構在尖端頂點187處保持完整，則尖端186可繼續用於提供離子束192給顯微鏡系統200。然而，在某些情形下，尖端186之FIM或SFIM成像可揭露三聚物結構於尖端頂點187上已不再完整。在此情況下，尖端186可首先加以場蒸發以使尖端成圓形且移除損壞的三聚物結構，並接著使用如以上說明的一程序加以原處重新銳化(例如無需從顯微鏡系統200移除尖端186)。

可以根據諸如減小的性能(例如減小的離子電流)、觀察的成像像差及/或誤差之準則或其他預定準則自動地執行自尖端186的場發射圖案之監視。為捕獲尖端186之FIM影像，樣本180可以從其位置加以移除，並且一偵測器(例如磷光體耦合CCD偵測器)可加以放置在樣本180之前的位置處。或者，具有相對較高二次電子產率的一平坦樣本可加以轉移至適當位置以取代樣本180，並且一適當偵測器可

加以固定並配置成偵測二次電子，其由於氦離子與該樣本的相互作用而離開該樣本。可以移除孔徑224(或可以選擇較大直徑的開口225)以便不會在很大程度上阻礙從氦氣體原子與尖端186的相互作用所產生的離子。可以採用自動化方式執行此等操作。

為捕獲得尖端186之SFIM影像，如上所說明可以引入一偵測器以用於FIM成像，並且可以將孔徑224維持在適當位置。可以將對準偏轉器220及222用於橫跨孔徑224而光柵掃描尖端186之離子發射圖案以採用逐個像素的方式獲取尖端186之一影像。可以藉由電子控制系統170來自動化尖端186之一或多個影像的獲取，該電子控制系統可以控制孔徑的放置、樣本及偵測器的移動、以及施加於尖端186與對準偏轉器220及222的電位。

參考圖13，以上說明的對準程序通常將尖端186之一縱向軸線207與離子光學130之一縱向軸線132對準，以便尖端186之頂點187處的軸線207與132之間的距離d係小於2 mm(例如小於1 mm、小於500 μm、小於200 μm)。在某些具體實施例中，尖端186之頂點187處的軸線207與132之間的角度係2°或更小(例如1°或更小、0.5°或更小、0.2°或更小)。

擷取器190包含一開口191。一般而言，可以按需要選擇擷取器190之形狀及開口191之形狀。通常而言，選擇此等特徵以確保將氦離子有效率且可靠地引導至離子光學130。例如，如圖13所示，擷取器190具有在z方向上測量

的厚度t_e、在x方向上測量的寬度a之開口191、並且係固定於在z方向上測量的與尖端186之頂點187的距離e處。在某些具體實施例中，t_e係100 μm或更大(例如500 μm或更大、1 mm或更大、2 mm或更大)，及/或t_e係10 mm或更小(例如7 mm或更小、5 mm或更小、3 mm或更小)。在某些具體實施例中，尖端186之頂點187與擷取器190之間的距離e係10 mm或更小(例如8 mm或更小、6 mm或更小、5 mm或更小、4 mm或更小、3 mm或更小、2 mm或更小、1 mm或更小)。在某些具體實施例中，將擷取器190固定成於+z方向上比尖端186遠，如圖13所示。在某些具體實施例中，將擷取器190固定成於-z方向上比尖端186遠。例如在此類具體實施例中，尖端186透過擷取器190而突出並沿z軸線在+z方向上延伸至比擷取器190遠。雖然擷取器190係顯示為具有圖13中的特定組態，但是更特定而言，擷取器190可以係任何所需設計。例如，在某些具體實施例中，開口191可以具有任何所需形狀的彎曲側面。

擷取器190可一般針對尖端186而得到正或負偏壓。在某些具體實施例中，針對尖端186，施加於擷取器190的電位係-10 kV或更高(例如-5 kV或更高、0 kV或更高)，及/或20 kV或更低(例如15 kV或更低、10 kV或更低)。

可視需要地，抑制器188亦可以出現在尖端186附近。藉由調整施加於抑制器188的電位，可以將抑制器188用於(例如)改變尖端186附近的電場分佈。可以將抑制器188與擷取器190一起用於控制在尖端186處產生氦離子之軌道。

抑制器188具有在x方向上測量的寬度k之開口、在z方向上測量的厚度t_s、並且係固定於在z方向上測量的與尖端186之頂點的距離s處。在某些具體實施例中，k係3 μm或更大(例如4 μm或更大、5 μm或更大)及/或8 μm或更小(例如7 μm或更小、6 μm或更小)。在某些具體實施例中，t_s係500 μm或更大(例如1 mm或更大、2 mm或更大)，及/或15 mm或更小(例如10 mm或更小、8 mm或更小、6 mm或更小、5 mm或更小、4 mm或更小)。在某些具體實施例中，s係5 mm或更小(例如4 mm或更小、3 mm或更小、2 mm或更小、1 mm或更小)。在某些具體實施例中，如圖13所示，將抑制器188固定成沿+z方向比尖端186遠。在某些具體實施例中，將尖端186固定成沿+z方向比抑制器188遠，以便尖端186在+z方向上穿過抑制器188。

一般而言，可加以配置顯微鏡系統200以便在穿過擷取器190之後，可以按需要選擇離子束192中的離子之能量。通常而言，在穿過至離子光學130的入口開口133之後，離子束192中的離子之平均能量係5 keV或更高(例如10 keV或更高、20 keV或更高、30 keV或更高)及/或100 keV或更低(例如90 keV或更低、80 keV或更低、60 keV或更低、50 kV或更低、40 kV或更低、30 kV或更低)。例如某些具體實施例中，在穿過入口開口133之後，離子束192中的離子之能量係從5 keV至100 keV(例如從10 keV至90 keV、從20 keV至80 keV)。例如，在需要偵測透過一樣本發送的離子之具體實施例中，可以使用較高離子能量(例如從50 keV

至100 keV)。

此外在某些具體實施例中，可以改變離子束192中的離子之能量而不改變離子電流。即，可以調整施加於尖端186的電位以修改離子束192之平均能量而不在實質上改變自離子束192的離子束電流。

C.離子光學

參考圖14，離子束192從氣體場離子源120經由入口開口133進入離子光學130。離子束192首先穿過第一透鏡216。一般選擇第一透鏡216之位置及電位以將離子束192聚焦於交叉點C，其中點C係與孔徑224成在z方向上測量的距離p。一般而言，將第一透鏡216固定於在z方向測量的與入口開口133之一距離f處。在某些具體實施例中，距離f係5 mm或更大(例如10 mm或更大、15 mm或更大)，及/或30 mm或更小(例如25 mm或更小、20 mm或更小)。

一般而言，第一透境216可針對尖端186而得到正或負偏壓。在某些具體實施例中，相對於尖端186，施加於第一透鏡216的電位係-30 kV或更高(例如-20 kV或更高、-10 kV或更高)，及/或40 kV或更低(例如30 kV或更低、20 kV或更低、15 kV或更低、10 kV或更低)。

一般而言，距離p係1 mm或更大(例如5 mm或更大、10 mm或更大)，及/或100 mm或更小(例如70 mm或更小、50 mm或更小、30 mm或更小、20 mm或更小)。改變點C之位置可以改變孔徑224之位置處x-及/或y-方向上的離子束192之大小，此可以選擇性地控制離子束192中穿過孔徑224的

離子之小部分。雖然在圖14中顯示為固定成在-z方向上比孔徑224遠，但是交叉點C可以在某些具體實施例中固定成在+z方向上比孔徑224遠。

對準偏轉器220及222係配置成引導離子束192之一部分穿過孔徑224與第二透鏡226。可將各種設計及/或組件用於構造偏轉器。例如，在某些具體實施例中，偏轉器220及222可以分別為四極電極，其中串聯配置兩個四極電極。

偏轉器220及222可以分別在x-及y-方向上偏轉氦離子束192。可以調整施加於偏轉器220及222之電極電位以確保離子束192之一部分穿過孔徑224與第二透鏡226。在某些具體實施例中，調整施加於偏轉器220及222的電位以達到特定對準條件，並接著該等電位於顯微鏡系統200係在操作的同時保持靜態。藉由觀察離子束192，使用配置成(例如)使孔徑224成像的適當偵測器來估定透過孔徑224的離子束192之對準。還可以調整偏轉器220及/或222以便將穿過孔徑224的離子束192之部分與第二透鏡226之一縱向軸線對準。為估定透過第二透鏡226的離子束192之對準，可以變動施加於第二透鏡226的電位(共同稱為擺動)並且可以在成像偵測器上觀察結果。若因施加於第二透鏡226的變化電位而使離子束192之影像在大小方面改變但在位置方面不變，則透過第二透鏡226對準離子束192。若離子束192之中心的位置因變化電位而改變，則離子束192並未與第二透鏡226對準。在此情況下，可以進一步調整施加於

偏轉器222及/或220的電位並採用反覆方式重複擺動測試，直至達到對準。

一般而言，可以按需要選擇施加於對準偏轉器220及222之各電極元件的電位以產生離子束192相對於孔徑224及第二透鏡226至一特定位置之偏轉。偏轉器220及222中的電極之每個可針對一共同外部接地而得到正或負偏壓。一般而言，施加於任一電極的電位相對於共同外部接地可以係100 V或更低(例如75 V或更低、50 V或更低)及/或10 V或更高(例如25 V或更高、40 V或更高)。例如在操作期間，施加於偏轉器220及222中任一電極的電位相對於共同外部接地可以係從10 V至100 V(例如從10 V至75 V、從10 V至50 V)。

相對於離子束192固定孔徑224以使離子束192中的離子之一小部份可從該孔徑穿過。通常而言，孔徑224並沒有施加的電位。在某些具體實施例中，在x方向上測量之孔徑224中的開口225之寬度w係1 μm更大(例如2 μm或更大、5 μm或更大、10 μm或更大、15 μm或更大、20 μm或更大、25 μm或更大、30 μm或更大)，及/或100 μm或更小(例如90 μm或更小、80 μm或更小、70 μm或更小、60 μm或更小、50 μm或更小)。例如，在某些具體實施例中，w係從1 μm至100 μm(例如從5 μm至90 μm、從15 μm至50 μm、從20 μm至50 μm)。在某些具體實施例中，在y方向上測量之孔徑224中的開口225之寬度係1 μm更大(例如2 μm或更大、5 μm或更大、10 μm或更大、15 μm或更大、20 μm或

更大、25 μm或更大、30 μm或更大)，及/或100 μm或更小(例如90 μm或更小、80 μm或更小、70 μm或更小、60 μm或更小、50 μm或更小)。例如，在某些具體實施例中，w係從1 μm至100 μm(例如從5 μm至90 μm、從15 μm至50 μm、從20 μm至50 μm)。

將孔徑224固定在孔徑底板234上。孔徑底板234允許依據從電子控制系統170接收的控制信號，在x-y平面中轉移孔徑224。在某些具體實施例中，孔徑底板234亦可以允許沿離子光學130之縱向軸線132在z方向上轉移孔徑224。此外，在某些具體實施例中，孔徑底板234可以允許針對x-y平面而傾斜孔徑224。傾斜傾斜孔徑224可以用於將孔徑224之縱向軸線與離子光學130之縱向軸線132對準。

在某些具體實施例中，孔徑224可以包含具有不同寬度w的複數個開口。例如，圖15為包含多個開口225a至225g的圓盤形孔徑224a之俯視圖(沿z方向)。孔徑224a係配置成圍繞與孔徑224a的中心一致的樞軸點227旋轉。將開口225a至225g之每個的中心固定在與樞軸點227的相同距離處。因此可以藉由下列方式選擇特定大小的孔徑開口：旋轉孔徑圓盤224a以便將選擇的開口固定在離子束192的路徑中，並接著在需要的情況下轉移孔徑圓盤224a以確保開口與離子束192的正確對準。

圖16為一桿形孔徑224b之俯視圖(沿z方向)，該孔徑包含穿過孔徑224b的多個開口229a至229e。可以藉由選擇孔徑224b中的一開口來選擇孔徑大小。此選擇係藉由下列方式

加以執行：在平行於箭頭221的方向上轉移孔徑224b以將開口229a至229e之一開口與離子束192對準。

通常而言，開口225a至225g與229a至229e具有可以按需要加以選擇的直徑。例如，某些具體實施例中，該等開口之任一者的直徑可以係5 μm或更大(例如10 μm或更大、25 μm或更大、50 μm或更大)及/或200 μm或更小(例如150 μm或更小、100 μm或更小)。在某些具體實施例中，開口225a至225g及/或229a至229e的直徑可以係從5 μm至200 μm(例如5 μm至150 μm、5 μm至100 μm)。

在某些具體實施例中，除孔徑以外的器件可以用於使離子束192中的離子之僅一部分穿過離子光學130並撞擊在樣本180之表面上。例如，可以沿離子束之飛行路徑串聯固定兩個垂直切口。

像散校正器218一般係經由其形狀、沿離子束192之路徑的位置及施加的電位而配置成減小或消除離子束192中的像散。雖然各種組件可用於構造像散校正器218，但是像散校正器218通常為固定在孔徑224與掃描偏轉器219及221之間的八極電極。通常而言，將八極像散校正器之八個電極分成四個電極之兩個群組，其具有配置成調整四個電極之電壓的第一控制器(例如針對尖端186得到正偏壓的四個電極之第一群組)，以及調整其他四個電極之電壓的第二控制器(例如針對尖端186得到負偏壓的四個電極之第二群組)。以交變方式配置自第一及第二電極群組的電極以形成八極之區段，其中鄰近區段具有相反符號之偏壓電壓。

此電極配置形成尖頭場，其聚焦沿八極之縱向軸線傳播的離子束，並使軸線外離子束散焦。

一般而言，可以獨立地配置八極電極之每個，並且像散校正器218因此允許對離子束192進行敏感控制。在某些具體實施例中，施加於像散校正器218之電極之任一者的相對於共同外部接地之電位可以係-30 V或更高(例如-20 V或更高、-10 V或更高、-5 V或更高)，及/或30 V或更低(例如20 V或更低、10 V或更低、5V或更低)。

除對準偏轉器220及222以外，離子光學130包含掃描偏轉器219及221。通常將掃描偏轉器219及221固定在像散校正器218與第二透鏡226之間，雖然一般而言離子光學130內的掃描偏轉器219及221之其他配置也可行。

掃描偏轉器219及221係配置成掃描橫跨樣本180之表面的離子束192。例如，偏轉器219可加以配置成在x方向上偏轉離子束192，並且偏轉器221可加以配置成在y-方向上偏轉離子束192。藉由偏轉器219及221產生的組合式偏轉可以將離子束192固定在樣本180上的特定位置處。

通常而言，調整施加於偏轉器219及221的電位以產生離子束192之特定偏轉。施加的電位可以對稱式變動以在樣本180之一部分上光柵掃描離子束192。例如，在某些具體實施例中，按規則間隔採用步進方式增加施加於偏轉器221的電位以在y-方向上於離散步驟中(例如逐列)橫跨樣本180而偏轉離子束192。同時，採用步進方式增加施加於偏轉器219的電位以在x方向上於離散步驟中(例如逐行)橫跨

樣本180而偏轉離子束192。可以選擇增加施加於偏轉器221的電位所採用的速率，以便一旦離子束192已經由施加於偏轉器219之電位中的步進增加而橫跨所有行進行一完全掃描，則在y-方向將離子束192偏轉至一新列。對於每列而言，增量電位增加之相同步進圖案可以應用於偏轉器219以在x方向上於離散步驟中掠過離子束192。

一般而言，可以採用複數個電極形成掃描偏轉器219及/或221。例如，在某些具體實施例中，掃描偏轉器219及/或221可以分別包含一對平行板電極。偏轉器219中的電極可以定向成在垂直於藉由偏轉器221產生的離子束192之偏轉的方向上偏轉離子束192。

在某些具體實施例中，掃描偏轉器219及/或221可以係更複雜的設計。例如，掃描偏轉器219及/或221可以包含四極電極及/或八極電極。此等電極可以分別配置成在x-y平面中的單一方向上或在x-y平面中的多個方向上提供離子束192之偏轉。

掃描偏轉器219及221中的電極元件之每個可以針對共同外部接地而得到正或負偏壓。一般而言，施加於各電極的電壓可以係-150 V或更大(例如-100 V或更大、-50 V或更大、-20 V或更大)及/或150 V或更小(例如100 V或更小、50 V或更小、20 V或更小)。例如在操作期間，施加於偏轉器219及221中的每個電極之電壓可以係從-150 V至150 V(例如從-100 V至100 V、從-50 V至50 V、從-20 V至20 V)。

一般而言，選擇第二透鏡226之位置及電位以便第二透鏡226協助將離子束192聚焦於樣本180之表面181上。施加於第二透鏡226的電位一般可以針對共同外部接地而係正或負的。在某些具體實施例中，相對於共同外部接地，施加於第二透鏡226的電位係-50 kV或更高(例如-40 kV或更高、-30 kV或更高)，及/或40 kV或更低(例如30 kV或更低、20 kV或更低)。第二透鏡226係與孔徑224隔開在z方向上測量的一距離u。在某些具體實施例中，u係5 cm或更大(例如10 cm或更大、15 cm或更大)，及/或50 cm或更小(例如45 cm或更小、40 cm或更小、35 cm或更小、30 cm或更小、25 cm或更小、20 cm或更小)。

第二透鏡226係與樣本180隔開沿z軸線測量的距離h(共同稱為作業距離)。在某些具體實施例中，h可以係2 mm或更大(例如5 mm或更大、10 mm或更大、15 mm或更大、20 mm或更大)及/或200 mm或更小(例如175 mm或更小、150 mm或更小、125 mm或更小、100 mm或更小、75 mm或更小、65 mm或更小、55 mm或更小、45 mm或更小)。在某些具體實施例中，h係從2 mm至200 mm(例如從5 mm至175 mm、從10 mm至150 mm、從15 mm至125 mm、從20 mm至100 mm)。通常而言，h可以藉由下列方式加以調整：改變施加於第二透鏡226的電位以調整透鏡226之聚焦平面，以及(經由樣本操縱器140)將樣本180轉移至透鏡226之新聚焦平面。藉由顯微鏡系統200允許的相對較大距離h提供若干優點。例如，可以使用顯微鏡系統調查具有表面突出部分

的不均勻樣本。此外，樣本還可以傾斜成針對離子束192的主軸線之較大角度。例如，在某些具體實施例中，至樣本180之表面181的法線與離子束192的主軸線之間的角度係5°或更大(例如10°或更大、20°或更大、30°或更大、40°或更大、50°或更大、60°或更大)及/或85°或更小(例如80°或更小、75°或更小、70°或更小、65°或更小)。在某些具體實施例中，樣本180之表面181的法線與離子束192的主軸線之間的角度係從5°至85°(例如從10°至80°、從20°至70°、從30°至70°、從40°至60°)。另外，相對較大距離h還使各種偵測器及其他器件可得以固定成接近於表面181上的離子束192之入射區域，並且允許在相對較大範圍的立體角內偵測離開樣本的粒子。通常而言，此舉允許偵測較強的信號並偵測多種不同類型的信號(例如使用不同類型偵測器)。

在某些具體實施例中，第二透鏡226係成形為直角錐體，其具有10°或更大(例如15°或更大、20°或更大、25°或更大)及/或50°或更小(例如45°或更小、40°或更小、35°或更小)的錐半角。在某些具體實施例中，第二透鏡226之錐半角係從10°至50°(例如從15°至45°、從20°至40°)。透鏡226之相對較小的錐半角提供若干優點，包含樣本180針對離子束192的較大範圍傾斜角、以及表面181上的入射束光點附近的自由空間之較大積體，其中可以固定偵測器及其他器件。

如以上所說明，通常而言，實質上僅經由氦原子與尖端

186之頂點187處的三聚物原子之一的相互作用所產生的氦離子穿過孔徑224。然而在某些具體實施例中，可以設定離子光學130中的組件(例如第一透鏡216及/或對準偏轉器220、222及/或孔徑224)以便經由氦原子與該等三聚物原子之兩個原子的相互作用所產生的氦離子之一實質小部分穿過孔徑224。此可以藉由(例如)下列方式達到：適當地選擇施加於第一透鏡216及/或偏轉器220、222的電位，及/或改變孔徑224之大小(例如藉由選擇分別如圖15及16顯示的孔徑輪或桿上的不同孔徑開口)。在某些具體實施例中，可以設定離子光學130中的組件(例如第一透鏡216及/或對準偏轉器220、222及/或孔徑224)以便經由氦原子與所有三個三聚物原子的相互作用所產生的氦離子之一實質小部分穿過孔徑224。此可以藉由(例如)下列方式達到：適當地選擇施加於第一透鏡216及/或偏轉器220、222的電位，及/或改變孔徑224之大小(例如藉由選擇分別如圖15及16顯示的孔徑輪或桿上的不同孔徑開口)。

可視需要地，可以沿離子光學130中的離子束192之路徑固定一或多個額外電極(例如透鏡、偏轉器及/或其他元件)。例如，額外電極可加以固定在第二透鏡226後面，或可加以引入在現有元件之間。額外元件可針對尖端186而得到正或負偏壓以執行諸如增加或減少離子光學130內離子束192中的離子之能量及/或改變離子之軌道的功能。例如，可將一或多個加速電極固定在樣本180附近以改變離子束192中的離子入射在樣本180上所採用的能量。

另外舉例而言，離子光學130可以包含負偏壓(相對於共同外部接地)行襯管以增加樣本180之表面181上之離子束192中的離子之能量。該管可以相對於共同外部接地而偏壓成-50 kV或更大(例如-25 kV或更大、-15 kV或更大、-10 kV或更大)及/或-1 kV或更小(例如-3 kV或更小、-5 kV或更小)。一般而言，該管可加以定位在沿離子光學130之軸線132的任何位置，例如在孔徑224與第二透鏡226之間。例如某些優點可以藉由下列方式加以實現：在離子穿過離子光學130時對離子進行加速，減少相同帶電離子之間的相互作用時間，此可以有助於減小離子束192之散度。

在某些具體實施例中，樣本180之表面181上之離子束192中的離子之能量可以藉由下列方式加以增加或減少：使樣本180偏壓(例如在需要減少離子束192中的離子之能量的情況下使之正偏壓，或在需要增加離子束192中的離子之能量的情況下使之負偏壓)。在離子束192之較大入射角的情況下，藉由偏壓之樣本180所產生的電場之圓筒形不對稱可以產生稜鏡狀效應，其中離子束192中的低能量離子比較高能量離子在x-及y-方向上得到較大數量的偏轉，從而導致樣本180之表面181上的離子束192之光點大小的增加及可能的其他不合需要之後果。因此在某些具體實施例中，使樣本180偏壓以改變離子束192中的離子之能量，並且離子束192與表面181之法線之間的角度係小於6°(例如小於5°、小於4°、小於3°、小於1°)。

雖然已說明離子光學之某些具體實施例，但是也可以使用離子光學之其他具體實施例。舉例而言，在已說明某一電極類型(例如八極)的情況下，可以將一或多個不同電極類型(例如四極)用於達到相同效應。更一般而言，可以在顯微鏡系統200中使用各種不同離子光學系統。例如，在某些具體實施例中，離子光學130包含除偏轉器、孔徑及其他離子光學元件以外的僅一單一透鏡。在某些具體實施例中，離子光學130包含第一及第二透鏡，兩者之間具有孔徑。

另外舉例而言，在某些具體實施例中，該離子光學包含第一透鏡、第二透鏡、第一與第二透鏡之間的孔徑，不包含電極，並且設計該離子光學以便第一透鏡可以減小離子束的散度(例如，以便將離子束實質上與該離子光學系統之縱向軸線對準)，孔徑可以阻止離子束之一部分穿過，並且第二透鏡可以有助於將離子束聚焦成樣本之表面上的相對較小之光點大小。在此類具體實施例中，可以主要藉由氦原子與三聚物之僅一個原子的相互作用而產生離子束中到達樣本之表面的離子(例如，如以上所說明)。在某些具體實施例中，經由氦原子與三個三聚物原子之每個的相互作用而產生離子束中到達樣本之表面之接近相等數目的離子。

另外舉例而言，在某些具體實施例中，該離子光學包含第一透鏡、第二透鏡、第一與第二透鏡之間的孔徑，不包含電極，並且設計該離子光學以便第一透鏡可以將離子束

聚焦至孔徑中的開口之中心，並且孔徑可以使聚焦的離子束可發散並穿過，而且第二透鏡可以有助於將離子束聚焦成樣本之表面上的相對較小之光點大小。在此類具體實施例中，到達樣本之表面的離子束可以包含藉由氣體原子與三聚物中的三原子之每個的相互作用而產生之接近相等數目的離子。若尖端186之頂點包含三個以上的原子(例如五個或更多原子、七個或更多原子、九個或更多原子)，則離子束可以包含經由氣體原子與尖端186之頂點處的原子之每個的相互作用所產生之接近相等數目的離子。

另外舉例而言，在某些具體實施例中，該離子光學包含第一透鏡、第二透鏡、第一與第二透鏡之間的孔徑，不包含電極，並且設計該離子光學以便第一透鏡可以減小離子束之散度並將低散度離子束引導至孔徑，孔徑可以使離子束中的實質上所有離子可穿過，而且第二透鏡可以有助於將離子束聚焦成樣本之表面上的相對較小之光點大小。在此類具體實施例中，到達樣本之表面的離子束可以包含經由氣體原子與三聚物中的三原子之每個的相互作用而產生之接近相等數目的離子。若尖端186之頂點包含三個以上的原子(例如五個或更多原子、七個或更多原子、九個或更多原子)，則離子束可以包含經由氣體原子與尖端186之頂點處的原子之每個的相互作用所產生之接近相等數目的離子。

另外舉例而言，在某些具體實施例中，該離子光學包含第一透鏡、第二透鏡、第一與第二透鏡之間的孔徑，不包

含電極，並且設計該離子光學以便第一透鏡可以將離子束部分地聚焦至孔徑，孔徑可以阻止離子束中的離子之一部分穿過(但仍使離子束中的離子之一相對較大部分可穿過)，而且第二透鏡可以有助於將離子束聚焦成樣本之表面上的相對較小之光點大小。在此類具體實施例中，到達樣本之表面的離子束可以包含經由氣體原子與三聚物中的三原子之每個的相互作用而產生之接近相等數目的離子。若尖端186之頂點包含三個以上的原子(例如五個或更多原子、七個或更多原子、九個或更多原子)，則離子束可以包含經由氣體原子與尖端186之頂點處的原子之每個的相互作用所產生之接近相等數目的離子。

D.尖端傾斜及轉移機制

尖端操縱器208係配置成允許轉移x-y平面中的尖端186，並且針對離子光學130之軸線132而傾斜尖端186。圖17為包含尖端186、支撐裝配件520及尖端操縱器之一具體實施例的顯微鏡系統200之一部分的斷面圖。尖端操縱器208包含軸502、圓頂504、側翼510及轉移器514。將轉移器514與軸502連接，該軸的尺寸係定為適合穿過側翼510中的開口516。將軸502進一步與基座508連接，依次將該基座與裝配件520連接。側翼510係藉由表面512與513之間的靜態摩擦力相對於圓頂504而處於固定位置，並且轉移器514係藉由表面518與519之間的靜態摩擦力相對於側翼510而處於固定位置。

尖端操縱器208提供尖端186在x-y平面中的轉移。為轉

移尖端206，將高壓力氣體引入進口503。引入進口503的高壓力氣體可以為諸如室內空氣之氣體。通常而言，可以在每平方英吋50磅(psi)或更大(例如75 psi或更大、100 psi或更大、125 psi或更大)的壓力情況下引入氣體。因引入高壓力氣體，所以在-z方向上遠離側翼510而將力施加於轉移器514。施加的力會減小表面518與519之間的摩擦力(但並不減小至零)，而且允許藉由在平面x-y中施加橫向力針對側翼510而重新固定轉移器514。當重新固定轉移器514時，在平面x-y中轉移尖端186。當尖端186係處於其新的位置時，關閉高壓力氣體之供應並且藉由使用一或多個真空幫浦抽空尖端操縱器208之內部而重新建立表面518與519之間的強靜態摩擦力。因重新建立的強摩擦力而將尖端186剛性地固定在適當位置。

尖端操縱器208亦提供針對離子光學130之軸線132而傾斜尖端186。為傾斜尖端186，將高壓力氣體引入進口505。引入進口505的高壓力氣體可以為諸如室內空氣之氣體。通常而言，可以在每平方英吋50磅(psi)或更大(例如75 psi或更大、100 psi或更大、125 psi或更大)的壓力情況下引入氣體。因引入高壓力氣體，所以在-z方向上遠離圓頂504而將力施加於側翼510。施加的力會減小表面512與513之間的摩擦力(但不會減小至零)。接著可以藉由在由箭頭506指示的方向上施加橫向力以轉移側翼510來針對圓頂504重新固定側翼510。側翼510的轉移對應於沿圓頂504之曲面的相對移動。因為此移動，所以軸線132與207之間的

角度(其對應於尖端186之傾斜角)會改變。當尖端186之傾斜度的調整結束時，關閉高壓力氣體之供應並且藉由抽空尖端操縱器208之內部而重新建立表面512與513之間的強靜態摩擦力。因重新建立的強摩擦力而將尖端186剛性地固定在適當位置。

在某些具體實施例中，如圖17所示，配置尖端操縱器208以便圓頂504之曲率半徑R的中心與尖端186之頂點的位置一致。因此，當傾斜尖端186以改變軸線132與207之間的角度時，尖端186在x-y平面中的轉移並不會出現。因此，尖端操縱器208可用於將經由氣體原子與尖端原子之一的相互作用所產生的離子之軌道與第一透鏡216之縱向軸線對準，而不引起尖端186針對第一透鏡216之軸線的轉移。

在某些具體實施例中，尖端操縱器208可加以配置成允許圍繞額外頂點的旋轉運動。例如在如圖17所示的具體實施例中，當將高壓力氣體引入進口503以減小表面518與519之間的摩擦力並允許轉移器514在x-y平面中轉移時，亦可以藉由施加適當的扭力於轉移器514而使轉移器514圍繞軸線207旋轉。此旋轉可與尖端186之轉移及尖端186之傾斜度調整而分離地或另外加以執行。

E.樣本台

再次參考圖5，顯微鏡系統200包含一樣本操縱器140，其用於支撐並固定樣本180。為回應自電子控制系統170的控制信號，樣本操縱器140可以在x-、y-及z-方向之每個上

轉移樣本180。在某些具體實施例中，樣本操縱器140還可以在x-y平面中旋轉樣本180以回應控制信號。此外，在某些具體實施例中，樣本操縱器140可以傾斜x-y平面外面的樣本180以回應適當的控制信號。可以獨立地調整此等自由度之每個以達到樣本180針對離子束192的適當定位。

如以下更詳細地說明，在某些具體實施例中，藉由施加相對較小的電位於樣本操縱器140，樣本操縱器140可以針對共同外部接地而得到正或負偏壓。例如，在某些具體實施例中，相對於共同外部接地之5 V或更大(例如10 V或更大、20 V或更大、30 V或更大、40 V或更大、50 V或更大)的正電位偏壓可以施加於操縱器140以協助防止帶正電的氬離子黏著於樣本180之表面181。在某些具體實施例中，相對於共同外部接地之-200 V或更高(例如-150 V或更高、-100 V或更高、-50 V或更高、-40 V或更高、-30 V或更高、-20 V或更高、-10 V或更高、-5 V或更高)的負電位偏壓可施加於操縱器140以協助(例如)加速二次電子遠離樣本(經由離子與樣本180的相互作用而離開樣本180之表面181)，從而確保可以藉由適當配置的偵測器來偵測二次電子。一般而言，可以依據處於研究當中的特定材料、氬離子電流及樣本的曝露時間，按需要選擇施加於操縱器140的電位。

F.偵測器

圖5示意性地描述偵測器150及160，其中將偵測器150固定成偵測自樣本180之表面181(離子束撞擊在上面之表面)

的粒子，並且將偵測器160固定成偵測自樣本180之表面183的粒子。一般而言，可以在顯微鏡系統200中使用較大範圍的各種不同偵測器以偵測不同粒子，並且顯微鏡系統200可以通常包含任何所需數目的偵測器。可以依據欲加以測量的粒子及測量條件來選擇各種偵測器之組態。在某些具體實施例中，可使用光譜分解式偵測器。此類偵測器能夠偵測不同能量之粒子及/或波長，並且根據每個偵測的粒子之能量及/或波長而分解粒子。在某些具體實施例中，光譜分解式偵測器包含能夠根據粒子之能量及/或波長而將粒子引導至偵測器之不同區域的組件。

以下說明某些示範性偵測器與偵測器之配置。

(i) Everhart-Thornley偵測器

Everhart-Thornley(ET)偵測器可用於偵測二次電子、離子及/或中性粒子。圖18顯示ET偵測器600之一示意圖，該偵測器包含粒子選擇器601、轉換材料602、支撐件604、光子偵測器606及電壓來源607與608。

粒子選擇器601係採用導電材料形成。例如，在某些具體實施例中，粒子選擇器601可以為金屬柵格或網格，其具有小於接近30%(例如小於25%、小於20%、小於10%、小於5%)的金屬填充因數。因為柵格主要係開放空間，所以撞擊在柵格上的粒子可以相對不受阻礙地穿過。

在某些具體實施例中，粒子選擇器601係採用金屬環或管形成。例如，粒子選擇器601可以為實質上呈圓筒形狀的環或管，其具有使粒子可穿過環或管的內部開口。環或

管可以採用高導電金屬(例如銅或鋁)形成。

更一般而言，可以採用任何開放式電極結構來形成粒子選擇器601，該結構包含供粒子穿過的通道。可以採用一或多個電極形成粒子選擇器601，並且一般可以依據所測量的粒子之類型，按需要選擇施加於一或多個電極的電位。

轉換材料602係採用在與帶電粒子(例如離子、電子)相互作用後可以形成光子的材料形成。示範性材料包含磷光體材料及/或閃爍物材料(例如結晶材料，如釔鋁石榴石(YAG)及釔鋁磷酸鹽(YAP))。支撐件604係採用對藉由轉換材料602形成的光子具相對透明性的材料形成。

在操作期間，電壓來源607施加相對較小大小之電壓(例如500 V或更小，例如從100 V至500 V)於粒子選擇器601(採用導電材料形成)，並且電壓來源608施加相對較大大小之電壓(例如5 kV或更大、10 kV或更大)於轉換材料602。在將ET偵測器用於測量自樣本180的電子(例如二次電子)之具體實施例中，施加於粒子選擇器601及轉換材料602的電壓之信號針對樣本180係正的。在將ET偵測器用於測量自樣本180的離子(例如二次離子、散射離子)之具體實施例中，施加於粒子選擇器601及轉換材料602的電壓之信號針對樣本180係負的。在某些具體實施例中，樣本180亦可偏壓(針對共用外部接地)成協助將自樣本180的粒子遞送至偵測器600。例如，當將ET偵測器用於測量自樣本180的二次電子時，該樣本可以相對於共同外部接地而得到負偏

壓。施加負電位偏壓於操縱器140可以特別有用，例如當偵測於樣本中的一高縱橫比(例如深)孔或通道中產生之二次電子時。相對於共同外部接地的負電位偏壓可以協助加速孔或通道外面且遠離樣本的電子，從而使電子的偵測比較輕易。在缺少負偏壓的情況下，許多二次電子可相反地在沿孔或通道壁之點處重新進入樣本，從而絕不會逃離孔或通道以得到偵測。

例如當將ET偵測器用於測量自樣本180的離子時，該樣本可以得到正偏壓。施加以使樣本偏壓的電位之大小可以係5 V或更大(例如10 V或更大、15 V或更大、20 V或更大、30 V或更大、50 V或更大、100 V或更大)。

自樣本180的帶電粒子610(例如電子或離子)係吸收至粒子選擇器601、穿過粒子選擇601、並朝轉換材料602加速。帶電粒子610接著與轉換材料602碰撞，從而產生光子612。光子612穿過支撐件604並藉由光子偵測器606加以偵測。

雖然已針對測量帶電粒子說明ET偵測器之操作，但是也可以將ET偵測器用於偵測中性粒子，因為撞擊在轉換材料602上的粒子不必帶電以產生光子612。特定言之，自樣本180且撞擊在轉換材料602上的一次原子可以產生光子612以藉由光子偵測器606進行偵測。光子偵測器606可以係(例如)光電倍增管(PMT)、二極體、二極體陣列或CCD相機。

可以將ET偵測器相對於樣本180定位在任何位置以偵測

中性或帶電粒子。例如通常而言，將ET偵測器固定成鄰近於離子光學130之第二透鏡226。可視需要地，ET偵測器也可加以固定以便其係朝樣本180稍微向下傾斜(例如採用類似於就圖5中的偵測器150加以描述的組態之組態)。

在某些具體實施例中，ET偵測器可加以固定在樣本180之表面183附近。可能需要此組態，例如當尋求測量自樣本180、從表面183顯現(例如在透過樣本180加以發送之後)的二次電子時。在此類具體實施例中，ET偵測器可以具有類似於圖5中的偵測器160之組態的組態。

(ii)光子偵測器

為偵測藉由離子與樣本180之相互作用所產生的光子，可以使用諸如PMT之標準光子偵測器。若從樣本180放射的光子通量係足夠大，則可以使用較少的敏感光子偵測器(例如二極體、二極體陣列及CCD相機)。

在某些具體實施例中，光子偵測器還可以包含各種光學元件，其可加以配置成(例如)從其他光學信號當中隔離重要的特定光學信號。例如，在某些具體實施例中，光學偵測器可以包含光學元件(例如濾波器)以在從樣本180顯現的光子信號中選擇特定波長頻帶，其可以提供關於樣本180的材料組分資訊。濾波器可以(例如)阻止非所需波長之光子(例如藉由吸收非所需波長之光子、藉由反射非所需波長之光子、藉由使非所需波長之光子轉向)。在某些具體實施例中，光學元件可以藉由下列方式提供光譜解析度(例如以測量由樣本180產生的光子之光譜)：在空間上分散

不同波長(例如使用諸如一或多個光柵之繞射元件、及/或諸如一或多個稜鏡之折射元件、及/或提供光子之波長分解偵測的一或多個光譜儀系統)。在某些具體實施例中，光子偵測器可以包含極化操縱元件，例如波板及/或極化器。此等極化操縱元件可加以配置成(例如)使僅具有選擇的極化狀態之光子可到達PMT，從而允許從樣本180顯現的光子信號之極化選擇性偵測(例如以協助決定樣本180的結晶定位資訊)。在某些具體實施例中，光子偵測器還可以包含光學元件，例如反射鏡、透鏡、分光器及用於重新引導並操縱入射光子之其他元件(例如以增加所偵測的光子之立體角度)。

一般而言，可以固定光子偵測器以偵測處在與樣本180的任一所需角度與距離的光子。例如，在某些具體實施例中，可以固定光子偵測器以偵測從表面181(樣本180之表面，離子束192係入射在該表面上)或從表面183(樣本180之表面，其係與離子束192的入射表面相反)顯現的光子。可視需要地，可使用多個光子偵測器且加以配置以偵測自樣本180之表面181(離子束撞擊的表面)、183(離子束撞擊的表面之相反側上的表面)及/或其他表面的光子。

對於某些範例而言，光子係依據用於出現在樣本180中的光學程序之選擇規則在特定方向上散射，並且自樣本180的光子產率之角度分解測量可以提供(例如)關於樣本180的材料組分資訊。

(iii)微通道板偵測器

在某些具體實施例中，微通道板偵測器可用於放大自樣本180的二次電子、中性原子或離子之通量。微通道板係一般採用諸如熔化矽之材料形成，並且一般包含以陣列形式配置的大量小直徑通道。粒子進入個別通道並與通道壁碰撞，從而產生自由電子。通常而言，一粒子(中性原子、離子或電子)每次與一通道壁碰撞時均產生多個自由電子。因此，對應於輸入粒子信號之放大倍率的串聯電子信號會退出微通道板。

以微通道板為基礎的偵測器(其可以包含一或多個微通道板)可加以配置成偵測自樣本180的離子、二次電子及/或中性原子。從樣本180形成的中性粒子及/或離子(例如二次離子與原子、散射離子與一次原子)通常會離開樣本180之表面181(離子束撞擊的表面)。因此，配置成測量自樣本180的中性粒子及/或離子之以微通道板為基礎的偵測器係通常定位在類似於圖1及5中描述的偵測器150之位置的位置處。然而，在某些具體實施例中，可以調查中性粒子及/或離子(例如發送的離子)。在此類具體實施例中，以微通道板為基礎的偵測器可加以定位在類似於圖1及5中的偵測器160之位置的位置處。二次電子可以從表面181(離子束撞擊的表面)及/或樣本180之表面183(離子束撞擊的表面之相反側上的表面)加以偵測，並且配置成偵測自樣本180的二次電子之以微通道板為基礎的偵測器係定位在類似於如圖1及5中描述的偵測器150及/或偵測器160之位置的位置處。

微通道板放大一輸入粒子信號並將該輸入粒子信號轉換成一輸出電子信號。為形象化該輸出電子信號，以微通道板為基礎的偵測器亦可以包含轉換材料、螢幕、及光子偵測器(參見以上說明)。

在某些具體實施例中，將微通道板直接附於離子光學130之元件。圖19顯示直接安裝於第二透鏡226上的微通道板偵測器620之斷面圖。第二透鏡226具有錐形，其具有平坦下表面622。將偵測器620直接安裝於表面622上。當將樣本180曝露於離子束192時，可以藉由微通道板偵測器620偵測自樣本180的離子、二次電子及/或中性原子(共同藉由箭頭624所指示)。偵測器620暫存與偵測的粒子通量成比例之一電流，其可加以傳送至電子控制系統170。

(iv)轉換板

在某些具體實施例中，轉換板可用於偵測自樣本180的離子(例如散射離子、二次離子)或自樣本180的中性粒子(例如一次中性氦原子)。通常而言，可以採用一薄箔材料形成轉換板，該材料在藉由入射離子或原子所衝擊時具有高二次電子產率。此材料之一範例係鉑。二次電子產率會產生二次電子之豐度，該等電子可藉由配置為(例如)偵測器150及/或160(圖1及5)之適當電子偵測器加以輕易地偵測。

(v)通道增倍器偵測器

通道增倍器偵測器亦可用於偵測諸如離開樣本180的電子、離子及中性原子之粒子。通道增倍器偵測器藉由下列

方式發揮功能：採用類似於結合微通道板偵測器加以說明的方式之方式透過多次內部碰撞而放大粒子信號。藉由測量由通道增倍器偵測器輸出的放大粒子信號(例如使用電子控制系統170)，可以測量自樣本180的相對較弱二次電子、離子或中性原子通量。當測量自樣本180的二次電子時，可以將通道增倍器偵測器定位在類似於圖1及5中的偵測器150及/或偵測器160描述之位置的位置處。通常而言，為測量自樣本180的離子及/或中性粒子，將通道增倍器偵測器定位在類似於如圖1及5中描述的偵測器150之位置及/或偵測器160之位置的位置處。

(vi)磷光體偵測器

以磷光體為基礎的偵測器(其包含沉積在透明基板頂上的一磷光體材料薄層)，及一光子偵測器(例如一CCD相機、一PMT或一或多個二極體)可用於偵測自樣本180的電子、離子及/或中性粒子。粒子衝擊磷光體層，從而引發自磷光體的光子之發射，該等光子係藉由光子偵測器所偵測。以磷光體為基礎的偵測器可加以配置在類似於如圖1及5中描述的偵測器150及/或偵測器160之位置的位置處，此取決於所測量的粒子之類型(參見以上說明)。

(vii)固態偵測器

固態偵測器可以用於偵測自樣本180的二次電子、離子及/或中性原子。固態偵測器可以採用由諸如矽之材料或摻雜矽材料形成的感測器進行構造。當入射粒子衝擊感測器時，在感測器材料建立電洞對，從而產生可以藉由電子

控制系統170加以偵測的電流。藉由入射粒子產生的電洞對之數目，及因此所產生的電流之對應大小，部分取決於粒子之能量。因此，固態偵測器可以特別用於粒子之能量測量，此可以在偵測自樣本180的高能量粒子(例如散射氬離子及中性氬原子)時尤其有利。

(viii)閃爍物偵測器

類似於以磷光體為基礎的偵測器，以閃爍物為基礎的偵測器包含閃爍物材料，其產生光子以回應受到入射粒子(電子、離子或中性原子)的衝擊。適當的閃爍物材料包含(例如)YAG及YAP。以閃爍物為基礎的偵測器中的光子產率取決於入射粒子之能量。因此，閃爍物偵測器可以特別用於粒子之能量測量，此可以在偵測自樣本180的高能量粒子(例如散射氬離子及中性氬原子)時尤其有利。

(ix)離子用之能量偵測器

可以實施各種不同的偵測器及偵測方案以測量自樣本180的離子(例如散射氬離子)之能量。在偏轉之數量取決於離子之能量的情況下將電場及/或磁場用於偏轉入射離子的靜電稜鏡偵測器可以用於在空間上分離具有不同能量的離子。磁性稜鏡偵測器還可用於根據離子之能量在空間上分離離子。以上說明的適當偵測器之任一者(例如微通道板、通道倍增器及其他偵測器)因此可用於偵測偏轉離子。

四極偵測器還可用於分析自樣本180的離子之能量。在四極偵測器中，四極內的射頻(RF)場確保具有選擇的質量

與能量之離子沿四極內的直、未偏轉軌道傳播。具有不同質量及/或能量的離子沿四極內的彎曲軌道傳播。可以從四極分析器內的離子之偏轉位置決定離子之能量。

在某些具體實施例中，可以藉由沿離子之飛行路徑且在偵測器前放置正偏壓粒子選擇器(例如導電材料之篩網或網格，或圓筒形金屬管或環)來決定離子能量。施加於粒子選擇器601的電位之大小最初可以係很高(例如用於防止自樣本180的離子穿過之某一數值)，並且可以減小該電位之大小，同時使用適當偵測器(參見以上說明)以偵測離子。與粒子選擇器上的電位偏壓之大小成函數關係之到達偵測器的離子之電流可用於決定關於離子之能量的資訊。

(x)電子用之能量偵測器

可以實施各種不同的偵測器及偵測方案以測量自樣本180的電子(例如二次電子)之能量。在偏轉之數量取決於離子之能量的情況下將電場及/或磁場用於偏轉入射電子的稜鏡偵測器可以用於在空間上分離具有不同能量的電子。以上說明的適當偵測器之任一者因此可用於偵測偏轉電子。

在某些具體實施例中，可以藉由沿電子之飛行路徑且在偵測器前放置負偏壓粒子選擇器(例如導電材料之篩網或網格，或圓筒形金屬管或環)來決定電子能量。粒子選擇器的電位之大小最初可以係很高(例如用於防止自樣本180的電子穿過之某一數值)，並且可以減小該電位之大小，同時使用適當偵測器(參見以上說明)以偵測電子。與粒子

選擇器上的施加電位之大小成函數關係之到達偵測器的電子電流可用於決定關於電子之能量的資訊。

(xi)飛行時間偵測器

以上揭示的偵測器還可加以配置成測量對於二次電子、離子及中性原子的飛行時間資訊。為執行飛行時間偵測，在脈衝模式中操作離子束192。例如，藉由迅速地改變施加於偏轉器220及222之一或兩者的電位，可以對電子束192施加脈衝。例如，藉由增加此等電位，可以使離子束192從其在離子光學130中的通常路徑轉向以便藉由孔224暫時阻塞離子束192。若偏轉器220及222之電位係接著恢復至其正常數值達較短的時間，然後再次增加，則可以將氦離子之脈衝遞送至樣本180。

同時，偵測器150及160可與自電子控制系統170的一時脈信號同步，該信號係基於施加於偵測器220及/或222之電位方面的時間變動。因此，可以準確地測量氦離子脈衝之發射與自樣本180的粒子之偵測之間的時間間隔。從關於離子光學130內的氦離子脈衝之傳播之時間的已知資訊，可以決定樣本180與偵測器150及/或160之間的偵測粒子之飛行的時間。

(xii)角度相依測量

除測量自樣本180的粒子之相對豐度與能量以外，角度相依散射資訊也可使用以上揭示的偵測器加以獲得。通常而言，為獲取角度相依資訊，將偵測器附於一底板(例如旋轉底板)，其允許偵測器在關於樣本180之一定範圍的立

體角內移動。在針對樣本180之對應於特定立體角的給定定位上，記錄粒子之豐度及/或能量測量。偵測器係按順序重新固定在不同立體角度，並且重複測量以決定測量的數量之角度相依性。在某些具體實施例中，諸如針孔之限制孔徑可在散射粒子之路徑中放置在偵測器的前面以進一步限制自樣本180的粒子之測量出現的角度範圍。

G.操作參數

離子束192可以具有樣本180之表面181上之相對較小的光點大小。例如，在某些具體實施例中，樣本180之表面181上的離子束192之光點大小可以具有10 nm或更小(例如9 nm或更小、8 nm或更小、7 nm或更小、6 nm或更小、5 nm或更小、4 nm或更小、3 nm或更小、2 nm或更小、1 nm或更小)的尺寸。在某些具體實施例中，樣本180之表面181上的離子束192之光點大小具有0.05 nm或更大(例如0.1 nm或更大、0.2 nm或更大、0.25 nm或更大、0.5 nm或更大、0.75 nm或更大、1 nm或更大、2 nm或更大、3 nm或更大)的尺寸。在某些具體實施例中，表面181上的離子束192之光點大小具有從0.05 nm至10 nm(例如從0.1 nm至10 nm、從0.2 nm至10 nm、從0.25 nm至3 nm、從0.25 nm至1 nm、從0.1 nm至0.5 nm、從0.1 nm至0.2 nm)的尺寸。參考圖20A至20C如下決定本文使用的光點大小。將採用金形成並具有從50 nm至2000 nm之尺寸的一島狀物1700置放在一碳表面1710上。該金島狀物係(例如)藉由金之汽相沉積而形成於該碳表面上。包含沉積在碳上的金島狀物且適合

於本文說明的解析度測量之測量樣本可(例如)採用商業方式從Structure Probe公司(賓夕法尼亞州West Chester市)購得。離子顯微鏡進行操作以便其橫跨金島狀物之一部分及金島狀物之一側上的碳表面之部分而線性地移動離子束192(箭頭1730)。二次電子之強度係測量為與離子束之位置成函數關係(圖20C)。漸近線1740與1750係計算(或繪製)為對應於碳與金之平均總豐度，並且垂直線1760與1770係計算(或繪製)為對應於漸近線1740與1750之間的豐度差異之總豐度分別為25%與75%的位置。離子顯微鏡200之光點大小係線1760與1770之間的距離。

一般而言，樣本180之表面181上的離子束192之電流係1 nA或更小(例如100 pA或更小、50 pA或更小)，及/或0.1 fA或更大(例如1 fA或更大、10 fA或更大、50 fA或更大、100 fA或更大、1 pA或更大、10 pA或更大)。例如，在某些具體實施例中，樣本180之表面181上的離子束192之電流係從0.1 fA至1 nA(例如從10 fA至100 pA、從100 fA至50 pA)。在某些具體實施例中，可能需要當使一樣本成像時使用相對較低的離子束電流。例如，在某些生物及/或醫藥應用中，比較重要的可能係使用低電流以使樣本成像(例如以減小對樣本的可能損壞)。在此類具體實施例中，一電流可用於製備使用的氣體場離子顯微鏡(例如10 fA或更大之電流)，並且一不同電流可用於使樣本成像(例如小於1 fA(如0.1 fA)之電流)。

一般而言，離子束192具有樣本180之表面181上的5 eV

或更小(例如4 eV或更小、3 eV或更小、2 eV或更小、1 eV或更小、0.5 eV或更小)之能量散佈。在此類具體實施例中，離子束192具有樣本180之表面181上的0.1 eV或更大(例如0.2 eV或更大、0.3 eV或更大、0.4 eV或更大)之能量散佈。例如，離子束192可以具有樣本180之表面181上的從0.1 eV至5 eV(例如從0.1 eV至3 eV、從0.1 eV至1 eV)之能量散佈。

離子束192可以具有樣本180之表面181上的相對較高亮度。例如，離子束192可以具有樣本180之表面181上的1×10^{9} A/cm^{2}sr(例如1×10^{10} A/cm^{2}sr或更大、1×10^{11} A/cm^{2}sr或更大)之亮度。在某些具體實施例中，可以藉由增加鄰近於尖端186的氣體壓力及/或減小尖端186之溫度而增加亮度。本文所指的離子束之亮度係如下測量。在x-及y-方向上決定擷取器190與第一透鏡216之間的空間之區域中之離子束192中的離子軌道之分佈的FWHM，在該區域中淨電場係相對較小並且離子軌道幾乎係直線。從離子束192中的離子軌道之分佈隨機選擇在x-及y-方向上之FWHM寬度內的總共100個離子軌道。100個離子軌道之每個幾乎係一直線，並且係朝尖端頂點187往回凸出。藉由在平行於x-y平面且穿過點z_t之平面Z_t中構造封閉向後傳播的軌道與平面Z_t之所有交叉點的最小直徑圓，估定沿z軸線之特定點z_t處的軌道之空間範圍。最小直徑圓的直徑係d_s。通常而言，對於較接近於尖端頂點187的點z_t而言，d_s將係較小並且對於較接近於樣本180的點z_t而言，d_s將係較大。在特

定點$z_t=z_0$處，d_s將係最小數值d_0。即，平行於x-y平面之平面中的軌道之空間範圍將係最小值。點z_0處的最小直徑圓之直徑d_0係稱為顯微鏡系統200之虛擬來源大小。接著，測量擷取器190與第一透鏡216之間的離子束192之FWHM區域中的離子束192之散度與離子束電流，如以上所說明。最終，亮度係計算為離子束電流除以虛擬來源大小與離子束192的立體發散角之乘積。

離子束192可以具有樣本180之表面181上的相對較高之減小亮度。例如，離子束192可以具有樣本180之表面181上的5×10^{8} A/m^2srV或更大(例如1×10^{9} A/cm^2srV或更大、1×10^{10} A/cm^2srV或更大)之減小亮度。本文所指的離子束之減小亮度係離子束之亮度除以測量離子束電流之位置處離子束中的離子之平均能量。

離子束192可以具有擷取器190之遠端193處的相對較低展度。例如，離子束192可以具有擷取器190之遠端193處的5×10^{-21} cm^2sr或更小(例如1×10^{-22} cm^2sr或更小、1×10^{-23} cm^2sr或更小、1×10^{-23} cm^2sr或更小、1×10^{-24} cm^2sr或更小)之展度。本文所指的離子束之展度係計算為亮度之倒數與離子束電流的數學乘積。

離子束192可以具有擷取器190之遠端193處的相對較低之減小展度。例如，離子束192可以具有擷取器190之遠端193處的1×10^{-16} cm^2sr或更小(例如1×10^{-17} cm^2sr或更小、1×10^{-18} cm^2sr或更小、1×10^{-19} cm^2sr或更小)之減小展度。離子束之減小展度係離子束之展度與測量離子束電流之位

置處離子束中的離子之平均能量對電荷比的數學乘積。

離子束192可以具有針對樣本180之表面181的相對較低角度會聚。例如，在某些具體實施例中，離子束192之會聚半角可以係5 mrad或更小(例如1 mrad或更小、0.5 mrad或更小、0.1 mrad或更小)，及/或0.05 mrad或更大。本文所指的離子束之會聚半角係如下測量。如以上所說明，包含碳基板頂上的金島狀物之樣本係安裝在離子顯微鏡200中並在z方向上轉移以便離子束192之聚焦的位置盡可能接近位於沿金島之直徑的最高水平點。接著沿金島狀物之直徑線性轉移離子束192並且測量該離子束之聚焦光點大小s_f，如以上所說明。樣本係接著在+z方向上遠離離子光學130而轉移s_z=1 μm，並且離子束192係沿金島狀物之相同直徑線性轉移以測量離子束192之散焦光點大小s_d。接著可從聚焦與散焦光點大小連同轉移距離之測量以三角度量方式將會聚角η決定為：

$$\eta = 2\sin^{-1}\left(\frac{s_d - s_f}{2s_z}\right)$$

離子顯微鏡200之會聚半角係η/2。

離子顯微鏡200可以具有高度可靠性。舉例而言，在某些具體實施例中，氦離子源(尖端186、擷取器190及可選的抑制器188)能夠與氣體原子連續地相互作用以產生離子束達一周或更長(例如兩周或更長、一個月或更長、二個月或更長)之時間週期，而無需從系統移除尖端186。在某些具體實施例中，在氦離子源係與氣體原子連續地相互作

用以產生離子束的時間週期期間，樣本180之表面181上的離子束192之電流變動達每分鐘10%或更小(例如5%或更小、1%或更小)。

另外舉例而言，在某些具體實施例中，氣體場離子源(尖端186、擷取器190及可選的抑制器188)能夠與氣體原子相互作用以產生離子束達一周或更長(例如兩周或更長、一個月或更長、兩個月或更長)之時間週期，其具有10個小時或更少(例如5個小時或更短、2個小時或更短、1個小時或更短)之總中斷時間。在此類具體實施例中，氣體場離子源可與氣體原子連續地相互作用以產生離子束達整個時間週期(對應於零小時之總中斷時間)，但是此並沒有必要。例如在該時間週期期間，可存在氣體場離子顯微鏡並非與氣體原子相互作用以產生離子束的次數。此類時間週期對應於一中斷時間。在該時間週期期間，此類中斷次數可出現一次或多次(例如二次、三次、四次、五次、六次、七次、八次、九次、十次)。中斷可以係由於(例如)排程維護、意外維護及/或偏移之間的停止時間(例如整夜停止時間)。在該時間週期期間，中斷次數的總數係總中斷時間。舉例而言，若在該時間週期期間存在三個中斷時間，每個時間係一個小時，則總中斷時間係三個小時。另外舉例而言，若在該時間週期期間僅存在一個中斷時間並且其係三個小時，則總中斷時間係三個小時。另外舉例而言，若在該時間週期期間存在兩個中斷時間，第一中斷時間係一小時並且第二中斷時間係兩個小時，則總中斷時間

係三個小時。在某些具體實施例中，對於在氣體場離子源係與氣體原子相互作用以產生離子束的時間週期期間之時間而言，樣本180之表面181上的離子束192之電流變動達每分鐘10%或更小(例如5%或更小、1%或更小)。

離子顯微鏡200可以具有相對較佳的解析度。例如，在某些具體實施例中，離子顯微鏡200之解析度可以係10 nm或更小(例如9 nm或更小、8 nm或更小、7 nm或更小、6 nm或更小、5 nm或更小、4 nm或更小、3 nm或更小、2 nm或更小、1 nm或更小)。在某些具體實施例中，離子顯微鏡200之解析度可以係0.05 nm或更大(例如0.1 nm或更大、0.2 nm或更大、0.25 nm或更大、0.5 nm或更大、0.75 nm或更大、1 nm或更大、2 nm或更大、3 nm或更大)。在某些具體實施例中，離子顯微鏡200之解析度可以係從0.05 nm至10 nm(例如從0.1 nm至10 nm、從0.2 nm至10 nm、從0.25 nm至3 nm、從0.25 nm至1 nm、從0.1 nm至0.5 nm、從0.1 nm至0.2 nm)。本文所用的離子束之解析度指可以從使用離子顯微鏡獲得之影像加以可靠測量的最小特徵之大小。若可以決定一特徵之大小係在該特徵之實際大小的10%或更小之誤差內，則可靠地測量該特徵之大小，並且從在類似條件下獲得的特徵之十個影像看，測量大小中的標準偏差係小於該特徵之實際大小的5%。

離子顯微鏡200可以用於在相對較短時間週期內得到良好品質影像。例如，離子顯微鏡200可以具有0.25或更大(例如0.5或更大、0.75或更大、1或更大、1.5或更大、2或

更大)之品質因數。本文所指的品質因數係如下決定。固定一平面樣本(其一半係採用矽(Si)形成並且其另一半係採用銅(Cu)形成，該等材料之間的一邊界係沿該樣本的直線)以便將該邊界定向成平行於y軸線。藉由將該樣本之表面細分成512個像素×512個像素之x-y陣列，逐個像素地使該樣本成像。在測量期間，每個像素的停留時間係100 ns。自樣本的二次電子之總豐度係測量為與樣本之表面上的離子束之位置成函數關係。對於對應於樣本中的Si之影像像素而言，決定平均像素強度G_1，連同自Si像素強度之分佈的標準偏差SD_1。對於對應於樣本中的Cu之影像像素而言，決定平均像素強度G_2，連同自Cu像素強度之分佈的標準偏差SD_2。依據下列等式計算品質因數：

$$\frac{G_1 - G_2}{\sqrt{SD_1 \cdot SD_2}}$$

樣本180之表面181可以在曝露於離子束192時經歷相對較小的損壞。例如，依據損壞測試，樣本180之表面181可以具有25 nm或更小(例如20 nm或更小、15 nm或更小、10 nm或更小、5 nm或更小)之數值。本文所指的損壞測試係如下執行。使具有四平方μm視場的自動平坦矽(99.99%純度)樣本成像達120秒，同時使用該樣本處10 pA的離子束電流及該樣本處離子束之10 nm或更小的光點大小，逐個像素地橫跨該樣本之表面而光柵掃描離子束。基於光柵掃描目的，將四平方μm視場分成512個像素×512個像素陣列。損壞測試之數值對應於蝕刻於由執行損壞測試所產生

的矽樣本之成像部分中的最大距離。

離子顯微鏡200可以具有相對較大的聚焦深度。例如，在某些具體實施例中，離子顯微鏡200之聚焦的深度可以係5 nm或更大(例如10 nm或更大、100 nm或更大、1 μm或更大)，及/或200 μm或更小(例如100 μm或更小、10 μm或更小)。在某些具體實施例中，顯微鏡200之聚焦的深度可以係從200 μm至5 nm(例如從500 μm至5 nm、從1 mm至5 nm)。本文所用的離子束之聚焦的深度係採用下列方式測量。將形成於碳基板上的金島狀物(如先前結合氦離子束光點大小之測量所說明)之一樣本插入氦離子顯微鏡中，並且執行氦離子束光點大小之測量，如以上所說明。反復地調整沿z軸線的樣本之位置以便決定產生最小氦離子束光點大小的樣本之位置。將沿z軸線的此位置表示為z_f。將在z_f的氦離子束之光點大小表示為ss_f。接著相對於z_f沿-z方向以增量方式轉移樣本。在連續的增量轉移之後執行氦離子束之光點大小測量(在用於決定z_f的樣本上之相同位置處)。當測量的氦離子束光點大小係2 ss_f時，停止樣本之轉移。將沿z軸線的樣本之此位置表示為z_u。接著，相對於z_u並透過點z_f沿+z方向以增量方式轉移樣本。在連續的增量轉移之後執行氦離子束之光點大小測量(在用於決定z_f的樣本上之相同位置處)。當測量的氦離子束光點大小係2 ss_f時，停止樣本之轉移。將沿z-軸線的樣本之此位置表示為z_l。將氦離子顯微鏡之聚焦的深度d_f計算為$d_f=|z_l-z_u|$。

在某些具體實施例中，使用(例如)二次電子產率、散射

離子豐度、及/或角度與能量分解散射離子偵測，如本文揭示的氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)可以用於區分具有很接近原子數目(Z數值)之樣本中的元素。例如，在某些具體實施例中，氣體場離子顯微鏡可以用於區分具有僅相差一個的原子數目(Z數值)之元素。

在某些具體實施例中，使用(例如)二次電子產率、散射離子豐度、及/或角度與能量分解散射離子偵測，如本文揭示的氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)可以用於區分具有很接近質量之樣本中的元素。在某些具體實施例中，氣體場離子顯微鏡可以用於區分具有相差一個原子質量單位或更小之質量(例如0.9原子質量單位或更小、0.8原子質量單位或更小、0.7原子質量單位或更小、0.6原子質量單位或更小、0.5原子質量單位或更小、0.4原子質量單位或更小、0.3原子質量單位或更小、0.2原子質量單位或更小、0.1原子質量單位或更小)的元素。在某些具體實施例中，一樣本可具有採用具有不同平均質量之材料(例如合金)形成的範圍。在此類具體實施例中，氣體場離子顯微鏡可以(例如)用於區分具有相差僅一個原子質量單位或更小(例如0.9原子質量單位或更小、0.8原子質量單位或更小、0.7原子質量單位或更小、0.6原子質量單位或更小、0.5原子質量單位或更小、0.4原子質量單位或更小、0.3原子質量單位或更小、0.2原子質量單位或更小、0.1原子質量單位或更小)的質量之材料之範圍。

H.可選特徵

(i)高效率氣體使用

在某些具體實施例中，氦氣體至尖端206的更聚焦遞送可以增加顯微鏡系統200內氦氣體利用之效率。通常而言，未離子化的氦氣體原子可以進入離子光學130，此可以增加離子束192中的離子之能量之分佈的寬度。另外，低能量未離子化氦氣體原子可以參與與高能量氦離子的電荷交換相互使用，此亦可以增加離子束192中的離子之能量分佈的寬度。

因此，在某些具體實施例中，可以將氣體遞送系統設計成採用更指定的方式提供氣體(例如氦氣體)給氣體場離子源120之尖端186，並採用更有效率的方式從系統移除未用氣體(例如未離子化氦氣體)。例如，圖21係包含氣體來源110及真空幫浦734的氣體場離子顯微鏡之一部分的示意圖。氣體來源110包含終止於遞送噴嘴736中的長度q及直徑n之遞送管730，並且真空幫浦734包含一進口埠732。將噴嘴736固定在與尖端186之頂點187的距離g處，並將進口埠732固定在與尖端186之頂點187的距離l處。

在某些具體實施例中，g可以係10 mm或更小(例如9 mm或更小、8 mm或更小、7 mm或更小)。通常而言，g係3 mm或更大(例如4 mm或更大、5 mm或更大、6 mm或更大)。例如，g可以係從3 mm至10 mm(例如從4 mm至9 mm、從5 mm至8 mm)。

在某些具體實施例中，l可以係100 mm或更小(例如90 mm或更小、80 mm或更小、70 mm或更小、60 mm或更

小、50 mm或更小)。通常而言，l係10 mm或更大(例如20 mm或更大、30 mm或更大、40 mm或更大)。例如，l可以係從10 mm至100 mm(例如從30 mm至100 mm、從40 mm至80 mm)。

在某些具體實施例中，尖端186之頂點187之位置處的氦氣體之局部壓力係10^{-5} Torr或更大(例如10^{-4} Torr或更大、10^{-3} Torr或更大、10^{-2} Torr或更大、10^{-1}Torr或更大、1 Torr或更大)。同時，可以相對於使用氦氣體之背景引入的系統而減小顯微鏡系統中的氦氣體之總體壓力。例如，顯微鏡系統200中的總體氦壓力係10^{-4} Torr或更小(例如10^{-5} Torr或更小、10^{-6} Torr或更小、10^{-7} Torr或更小、10^{-8} Torr或更小)。

在某些具體實施例中，選擇距離l及進口埠732之斷面面積以便真空幫浦734捕獲顯微鏡系統200之特定立體角區域內的未離子化氦原子。例如，對於固定在尖端186之頂點187處的氦原子而言，藉由進口埠732所對的立體角度係5°或更大(例如10°或更大、15°或更大、20°或更大、30°或更大、40°或更大)。

一般而言，可以選擇遞送管730之長度q與管730之直徑n的比率以控制遞送至尖端186的氦氣體原子之軌道的分佈。例如，在某些具體實施例中，比率q/n可以係3或更大(例如4或更大、5或更大、6或更大)及/或10或更小(例如9或更小、8或更小、7或更小)。在某些具體實施例中，比率q/n可以係在3與10之間(例如在3與9之間、在4與9之間、

在4與8之間、在5與8之間、在5與7之間)。

在某些具體實施例中，氣體遞送系統可以包含多個遞送管及噴嘴。例如，在某些具體實施例中，氣體遞送系統可以包含二或更多(例如三或更多、四或更多、五或更多、六或更多)個氣體遞送管。可以固定多個氣體遞送管之每個以採用相對直接的方式遞送氦氣體至尖端186。因使用多個氣體遞送管，所以可以更進一步地增加尖端186之頂點187之位置的氦氣體之局部壓力。一或多個真空幫浦可以用於從顯微鏡系統200移除未離子化氦氣體。

在某些具體實施例中，氣體遞送管730可以併入系統之另一組件中。例如，在某些具體實施例中，氣體遞送管730可以藉由用於擷取器190及/或抑制器188中的氣體遞送之一或多個過道(例如二或更多個過道、四或更多個過道、六或更多個過道)形成。在某些具體實施例中，可以在支撐尖端186的柱子(例如柱子522a/b與552)中提供用於氣體遞送的一或多個過道(例如二或更多個過道、四或更多個過道、六或更多個過道)。舉例而言，在某些具體實施例中，擷取器190可以包含用於將氣體遞送至尖端186的四個過道。該等過道可以等距離隔開並且沿擷取器190之圓周而加以徑向配置以便每個過道之開口直接面對尖端186。過道之每個的長度與直徑比率可以係相同或不同的。

可以藉由將氣體遞送管併入顯微鏡系統200之其他元件而實現若干優點。例如，使用放置成接近於用於氣體遞送

的尖端186之金屬管730可以擾動尖端186附近的電場。將氣體遞送管併入顯微鏡系統之另一元件可以消除此類擾動。另外舉例而言，尖端186附近的空間區域通常係擠滿用於操作顯微鏡系統200的電極及其他器件。藉由將氣體遞送管730併入系統之另一元件，可以減少尖端186附近的擁擠。

在某些具體實施例中，經由遞送管730遞送的氦氣體可加以預冷卻便該氣體在進入顯微鏡系統200時接近尖端186之操作溫度。例如，可以將遞送管730之一部分放置成與用於冷卻尖端186的冷卻劑(例如液態氮)之供應儲存庫接觸。因為此熱接觸，所以透過管730行進的氦氣體係冷卻至接近與尖端186相同的溫度，然後引入固定尖端186所處的反應室。

(ii)表面電荷中和

一般而言，當氦離子係入射在一樣本之表面上時，二次電子離開該樣本。許多二次電子離開樣本，從而產生具有淨正電荷的表面。樣本之表面上的過多正電荷可以產生若干不合需要的效應。在某些具體實施例中，樣本之材料可能受到正電荷的損壞。例如，某些材料係電荷敏感型，並可能於出現過多正(或負)電荷的情況下起劇烈反應(例如爆炸)。

在某些具體實施例中，樣本之表面上的正電荷可以限制用於偵測由於離子束與樣本的相互作用而離開樣本之二次電子的偵測器之能力。例如，樣本與二次電子之表面上的

正電荷之間的吸收力可以使電子減速，從而防止電子達到偵測器。

在某些具體實施例中，樣本之表面上的正電荷可以引起不準確的離子束光柵掃描。因藉由樣本之表面上的正電荷建立的電場而引起的入射離子束之偏轉與減速可以減小入射離子之能量，並且採用難以預測的方式改變其軌道。

若樣本之表面上的淨正電荷變得足夠大，則樣本之表面可以作為用於氦離子的靜電反射鏡，其在氦離子達到樣本之表面之前使氦離子遠離樣本之表面而偏轉。

能夠遞送電子之通量至樣本之表面的流槍可以用於抵消表面電荷效應。圖22顯示一氣體場離子顯微鏡之一部分，該顯微鏡包含一流槍840，其係配置成在氦離子束192係入射於樣本180之表面181上的同時遞送電子束842至表面181。一般可以控制表面181上的電子通量以便藉由電子束842將表面電荷效應平衡至所需範圍。

雖然圖22描述離子束192及電子束842同時撞擊在樣本180之表面181上，但是可使用其他方法。例如，在將表面181曝露於氦離子束192之前，流槍840可配置成遞送電子束842至樣本180以在樣本180之次表面區域中建立電荷層846(圖23)。層846具有表面181下面的平均深度m，並且層846具有在垂直於表面181之方向上測量的厚度r。一般而言，可以藉由電子束842中的電子之能量、電子束842中的電子針對表面181之入射角、以及遞送至樣本180的電子之總用量而控制深度m及厚度r與層846中的電子之密度。

在某些具體實施例中，當入射在表面181上時，可調整電子束842中的電子之平均能量。例如，電子之平均能量可以為500 eV或更大(例如1 keV或更大、2 keV或更大)，及/或20 keV或更小(例如15 keV或更小、10 keV或更小)。例如，當入射在表面181上時，電子束842中的電子之平均能量可以係從500 eV至20 keV(例如從1 keV至15 keV、從2 keV至10 keV)。

電子束842中的電子針對表面181的入射角δ對應於電子束842之主要軌道850與表面181之法線848之間的角度。一般而言，δ係0°或更大(例如10°或更大、20°或更大)，及/或80°或更小(例如70°或更小、60°或更小)。例如，δ可以係從0°至70°(例如從0°至10°、從40°至60°)。

在某些具體實施例中，遞送至樣本180的電子之總電流係10 pA或更大(例如100 pA或更大、1 nA或更大、10 nA或更大)，及/或100 μA或更小(例如10 μA或更小、1 μA或更小、500 nA或更小、100 nA或更小)。例如，遞送至樣本180的電子之總電流可以係從10 pA至1 μA(例如從100 pA至100 nA、從1 nA至10 nA)。

在某些具體實施例中，m係10 nm或更大(例如25 nm或更大、50 nm或更大、75 nm或更大、100 nm或更大)，及/或500 nm或更小(例如400 nm或更小、300 nm或更小、200 nm)。例如，m以係從10 nm至500 nm(例如從25 nm至500 nm、從50 nm至500 nm、從75 nm至400 nm、從100 nm至400 nm)。

在某些具體實施例中，可以使用多個流槍。例如，在某些具體實施例中，不同流槍可用於將樣本180之表面181之不同部分曝露於電子。在某些具體實施例中，每個流槍可以用於將表面181之相同部分曝露於電子。可視需要地，可以在不同時間操作不同流槍。例如，一或多個流槍可以用於將表面181曝露於電子，然後將表面181曝露於氦離子(例如以形成次表面電荷層)，而於亦將表面181曝露於氦離子的同時可以將一或多個不同流槍用於將表面181曝露於電子。在某些具體實施例中，所有流槍均可以用於將表面181曝露於電子，然後將表面181曝露於氦離子(例如以形成次表面電荷層)，而在某些具體實施例中，於亦將表面181曝露於氦離子的同時可以將所有流槍用於將表面181曝露於電子。亦可以使用其他組合。

雖然已說明可以使用流槍達到表面電荷中和的具體實施例，但是亦可以使用集極電極以收集噴射的二次電子並將其返回至樣本之表面以減少表面上的淨正電荷而達到表面電荷中和。參考圖24，經由導體854將集極電極852與樣本180連接。當將樣本180曝露於氦離子束192時，從樣本180之表面181噴射的二次電子(藉由箭頭856所表示)係入射在集極電極852上。接著經由導體854將電子856傳送回至表面181以減少表面181上的正電荷。可以將額外的集極電極852與樣本180連接以提供進一步的表面電荷中和。

在某些具體實施例中，可以使用一或多個集極電極與一或多個流槍之組合。例如，一或多個流槍可以用於將樣本

180之表面181曝露於電子，然後將表面181曝露於氫離子(例如以形成次表面電荷層)，並且在將表面181曝露於氫離子的同時可以將一或多個集極電極用於中和表面181上的電荷。亦可使用其他組合。

在某些具體實施例中，流槍840可加以配置成遞送很低能量電子束842至樣本180。例如，電子束842中的電子可以具有約50 eV或更小之平均能量。低能量電子具有低降落能量，並且此限制可以在表面181上累積的負電荷之數量。例如，若電子束842中的平均電子能量係50 eV，則一旦樣本180相對於共同接地而充電至-50 V之電位，則自流槍840的電子不再降落於該樣本之表面上。因此，藉由調整自流槍840的低能量電子之能量，可以控制樣本180之表面181上的最大累積負電荷。此方法可以用於使非導電材料成像而無需將一導電材料層沉積於非導電材料之頂部上以防止非導電材料之充電。圖25顯示此方法之一範例。離子束192係入射在樣本180之表面181上，該樣本係具有相對較低導電率的介電材料(例如樣本180並非金屬)。樣本180係藉由樣本操縱器140所支撐，該操縱器係相對於顯微鏡系統200之共同外部接地在-600 V之電位情況下偏壓。施加於操縱器140的電位在樣本180之表面181上建立電場。流槍840係配置成遞送包含具有500 eV之平均能量的電子之一電子束至撞擊離子束192附近的表面181。最初而言，由於施加於操縱器140的偏壓引起的表面181上之電場使得自流槍840的電子沿軌道(例如843a與843b)而偏轉，即

電子並不降落於表面181上。然而，隨著正電荷由於入射氬離子而累積在表面181上，樣本180會變為帶正電，從而減小藉由自流槍840的電子所經歷的電場強度。當樣本180之表面181上的電荷累積於該表面上的有效偏壓相對於共同接地而達到-500 V之點時，自流槍840的電子可以降落於表面181上並中和其上追隨諸如843c之軌道的正電荷。因此，藉由控制施加於操縱器140的偏壓與藉由流槍840遞送的電子之能量，可以控制樣本180上的正電荷累積。樣本180，即非導電材料，因此可加以成像而無需累積表面電荷，此可能另外導致由於由表面電荷產生的電壓對比度效應而引起的不合需要之影像對比度。可以獲得非導電及半導體材料之影像而無需將一導電材料層沉積於樣本上以作為電荷消散層。

在某些具體實施例中，流槍840可加以配置成遞送電子至樣本180，該等電子具有負降落能量，即於在樣本表面上缺少正電荷的情況下，根本不降落於表面181上的電子。當樣本180由於入射氬離子而獲取表面電荷時，自流槍840的電子開始降落於表面181上，從而中和正電荷。因此，將樣本180之表面181維持在接近不帶電狀態。

在某些具體實施例中，一轉換表面可以用於產生二次電子，其接著可以用於中和累積在樣本180之表面181上的正電荷。例如，採用具有高二次電子產率的材料(例鉑)形成之一轉換表面可加以固定成接近於樣本180。離開樣本180的高能量氬離子及/或中性原子可以衝擊轉換表面，從而

產生二次電子。所產生的二次電子經歷由於樣本180上的累積正表面電荷而引起的吸收力。因此，二次電子降落在樣本表面上，從而中和正電荷並減小由於表面電荷而引起的電場。因此，當存在表面正電荷之較大累積時，二次電子係更強烈地吸收在樣本180之表面181上。此提供用於減少表面電荷的自調節機制。

在某些具體實施例中，轉換板可以直接安裝於離子光學130之一元件以提供用於樣本180之表面電荷中和的二次電子。例如，在圖26中，將轉換板845附於第二透鏡226之表面。將自流槍840的電子842引導成入射在採用具有高二次電子產率的材料形成之轉換板上。氬離子束192係入射在樣本180之表面181上，並且隨著時間，正電荷累積在離子束192所入射之區域中的表面181上。從轉換板845產生的二次電子847係吸附於具有過多正電荷的表面區域並降落在此等區域上，從而中和過多的正電荷。一旦消除過多的表面電荷，則另外的二次電子不會降落於表面181上。因此，可以將表面181維持在準中性狀態。

一般而言，流槍840可加以配置用於連續或間歇操作。特定言之，在間歇操作期間，可以採用所需速率開啟並關閉流槍840。例如，在某些具體實施例中，可以開啟並關閉流槍840以採用像素曝露速率提供樣本180之電荷中和。離子束192可以在離散步驟中橫跨樣本180之表面而光柵掃描以曝露樣本表面之連續部分。在曝露每個部分之後，流槍840可以用於中和曝露區域中的表面電荷。此對應於採

用像素曝露速率的電荷中和。或者或另外，流槍840可以用於採用線掃描速率(例如在已將樣本180之離散部分的整個線曝露於離子束192之後)，及/或圖框速率(例如在已將樣本180之離散部分的整個二維區域曝露於離子束192之後)執行中和。

在某些具體實施例中，流槍840可以用於改良自樣本180的二次電子之偵測的輕易性。例如，流槍840可以用於將一電荷層(例如電荷層846)嵌入樣本180之大塊區域內。負電荷之嵌入層會在樣本180之表面181上引發一電場。由於樣本180與入射離子束192的相互使用而離開樣本180的二次電子係由於藉由電荷層846建立的電場而遠離樣本180加速，從而使得藉由適當配置的偵測器來偵測二次電子相對較輕易。

圖27A與27B示意性地顯示負電荷之嵌入層的使用之範例。在圖27A中，離子束192係入射在樣本180之表面181上。在樣本180之前幾奈米內產生複數個二次電子2012。首先，許多二次電子逃離為自由電子2014，其可以藉由適當配置的偵測器加以偵測。然而，隨著時間，入射氦離子會植入樣本180內，從而在樣本180內形成帶正電層2010。隨著層2010內的淨正電荷的增加，二次電子2012係不斷地吸收至層2010，並且越來越少的二次電子2012逃離樣本180成為自由電子2014。因此，經由二次電子之偵測而使樣本180成像可能不斷變得困難。

圖27B顯示對此問題的解決方式。在圖27B所示的具體

實施例中，流槍840(圖中未顯示)係用於將一負電荷層2016(例如電子)嵌入樣本180內。嵌入式負電荷層係類似於圖23中的層846。因為層2016，所以在樣本180中產生的二次電子2012係遠離樣本180而加速，從而導致逃離樣本180之產生二次電子2014之數目的增加，並因此增強自樣本的偵測二次電子信號。層2016有效地作為用於二次電子的靜電反射鏡，從而增強其偵測能力。

一般而言，流槍840可以用於將電子植入一樣本中，然後分析該樣本，及/或流槍840可以用於在使一樣本成像的同時將電子植入該樣本中。在某些具體實施例中，樣本可按間隔(例如規則間隔)曝露於自流槍840的電子。此可以(例如)協助維持相對一致的電荷位準。例如，樣本可在對應於每像素的停留時間(例如100 ns)之時間週期中曝露於自流槍840的電子。

(iii)振動去耦合

由於真空幫浦、各種移動零件及背景聲音干擾引起的機械振動可以影響氣體場離子顯微鏡系統200之某些性能參數(例如成像解析度、樣本180中的離子束光點大小、穩定性)。在某些具體實施例中，樣本操縱器140可加以配置成從系統200之其他零件去耦合樣本180，從而減小外部機械干擾之影響。圖28顯示一振動去耦合樣本操縱器140，其包含藉由驅動器908支撐之導針906，其中將針906及驅動器908分別定位在台904內。將支撐圓盤902固定在台904頂上，並且將支撐樣本180的摩擦三角架900放置在圓盤902

頂上。

為在x-y平面中移動樣本180，驅動器908從電子控制系統170接收適當的信號並驅動導針906。導針906輕推樣本180及/或三角架900，從而引起x-y平面中的轉移以回應自驅動器908的信號。

導針906在其頂點處的寬度j係通常選擇為稍小於三角架900中的孔徑910之直徑b。例如，j可以係1 mm並且b可以係1.1 mm。另外，選擇三角架900及圓盤902，以便圓盤902與三角架900之間的靜態摩擦力係較大，但是可以藉由驅動器908透過導針906施加於樣本180的力所克服。導針906係採用一機械適應材料所形成，該材料可以在施加之應力條件下變形以減少振動至樣本180的發送，但是係硬到足以將藉由驅動器908施加的力發送至樣本180。

因為此等系統參數，所以耦合至台904中的機械振動可加以部分地吸收並藉由導針906加以消散以便存在很少或不存在三角架900之振動。另外，若導針906並不施加力於三角架900，則導針906將較佳在三角架900之側上滑動而非引發三角架900之振動。

在某些具體實施例中，導針906可以具有實質矩形斷面形狀。矩形斷面形狀可協助確保樣本180及/或三角架900之旋轉不會隨藉由導針906在x-及/或y-方向上轉移三角架900而出現。若針對離子光學130之軸線132而傾斜樣本操縱器140(例如以便離子束192係以非垂直角度入射在樣本180上)，則可以選擇用於形成三角架900及/或圓盤902的材

料以便出現此等元件之間的更高靜態摩擦力。或者或另外，在某些具體實施例中，三角架900及圓盤902可加以磁性耦合以增加此等元件之間的摩擦力。可以仔細地實施磁場耦合以確保磁場得到局部化並且不會干擾樣本180或撞擊離子束192。

在並未驅動導針906時可以從三角架900完全脫開導針906。例如，在導針906已施加力於三角架900從而使三角架900及樣本180在x-y平面中轉移之後，可以藉由電子控制系統170引發導針906之較小彈回運動，該系統引入導針906與三角架900之間的空間。因此，從三角架900完全脫開導針906，並且防止經由導針906而將機械振動與三角架900耦合。

圖29描述用於顯微鏡系統的樣本固持器裝配件1510。樣本固持器裝配件1510減少承軸之並使用並有助於減少操作期間樣本中的低頻率機械振動。裝配件1510包含具有用於插入一樣本的一開口1512之主體1511。透過可調整連接器1522將主體1511與臂狀物1518連接。臂狀物1518使用夾具1520支撐樣本台1514。樣本台1514包含具有一孔徑1524的表面圓盤1516。

裝配件1510可與離子顯微鏡連接以便尖端186係指向樣本台1514上的孔徑1524。主體1511可採用適當的剛性材料(例如硬化鋼、不銹鋼、磷青銅及鈦)形成。主體1511可以定大小並成形以適合應用的特定需求。舉例而言，可以選擇主體1511之大小及形狀以用於本文揭示的顯微鏡系統。

在操作期間，可透過開口1512將樣本引入裝配件1510。

藉由沿可調整連接器1522與主體1511連接的臂狀物1518來支撐樣本台1514。可調整連接器1522允許臂狀物1518垂直移動。臂狀物1518與樣本台1514可以在垂直方向上加以移動並鎖定在特定位置。可以採用氣動或真空方式控制連接器1522以便可以將臂狀物1518與台1514較緊地鎖定在所需垂直位置。連接器1522可以視需要地包含其他類型之連接器。

使用夾具1520將樣本台1514與臂狀物1518連接。臂狀物1518可以具有向內延伸的一軸以便樣本台1514之夾具1520可以抱住該軸。可以採用氣動或真空方式操作夾具1520以便可以傾斜台1514。可以控制夾具1520以便傾斜台1514至所需位置。在某些具體實施例中，於已達到所需位置之後，可以緊固夾具1520以便將樣本台1514較緊地鎖定在所需傾斜位置。

樣本台1514進一步包含具有開口1524的表面圓盤1516。可將樣本放置在圓盤1516上並且可以透過開口1524引入樣本位置控制系統以移動圓盤1516之平面上的樣本。在某些具體實施例，圓盤1516可以圍繞其中心旋轉以按需要旋轉並移動定位在圓盤之表面上的樣本。圓盤1516可以採用包含陶瓷、玻璃與聚合物的適當剛性材料形成。

圖30描述用於顯微鏡系統的一樣本固持器裝配件。圖30之樣本固持器裝配件係類似於圖29之樣本固持器裝配件，其中將三角架1600放置圓盤1516之表面上。三角架1600可

以具有使其可固定在開口1524之頂部上的支架。可視需要地，三角架1600可以具有表面之一部分上的一開口。三角架1600可以採用包含陶瓷、玻璃與聚合物的適當剛性材料形成。

在顯微鏡系統200之操作期間，樣本180可以在z-方向上移動、傾斜、在x-y平面中轉移、及旋轉。若傾斜樣本180並且傾斜角(例如離子束192與樣本180之表面的法線之間的角度)係相對較大，則該傾斜樣本可能並非聚焦在顯微鏡系統200的整個視場內。因此，在此等條件下獲得的樣本之影像可能並未聚焦而且在中心以外並垂直於傾斜軸線的區域中變模糊。

於在樣本180之表面上掃描離子束192時，藉由改變透鏡226之焦距來補償此等條件。為執行此校正，樣本操縱器140可以發送用於樣本180的傾斜角資訊至電子控制系統170。或者可以經由使用者介面藉由系統操作者手動輸入傾斜角資訊。電子控制系統170可以根據樣本180之定位決定一組電壓校正以施加於第二透鏡226以於在傾斜樣本180之表面上掃描離子束192時動態地改變透鏡226之焦距。

另外，斜樣本之橫向尺寸係由於傾斜樣本在平面表面上的突出及由於與離子光學130之距離方面的差異而失真。例如，由於樣本180針對離子束192的定位，所以斜樣本表面之橫向尺寸可能出現為比其實際情況短。另一範例係影像之重點失真。效應係矩形特徵已失真，因此矩形之影像出現為其形狀方面的重點。

於在樣本180之表面上掃描離子束192時，可以藉由調整掃描偏轉器219及221之掃描大小來補償此等。為執行此校正，電子控制系統170可以採用與以上說明的相同方式獲得關於用於樣本180的傾斜角之資訊。電子控制系統170可以根據樣本180之傾斜度決定施加於掃描偏轉器219及221的掃描大小之調整以於在傾斜樣本180之表面上掃描離子束192時調適離子束偏轉，從而獲得傾斜樣本180之表面的未失真影像。或者，可藉由失真影像之數位操縱來校正此等二個失真效應。

(iv)減少離子束中的中性粒子與雙倍帶電離子之出現

如以上所說明，中性粒子(例如氦原子)可以進入顯微鏡系統200之離子光學130作為自氣體場離子源120的未離子化中性原子。此類中性粒子可以不利地影響顯微鏡系統之性能。因此，在某些具體實施例中，需要減少離子束192中的中性粒子之出現。還可以在氣體場離子源120中經由尖端186附近的氦原子之雙離子化或藉由氦離子之間的碰撞而產生雙倍帶電氦離子(例如He^{2+})。雙倍帶電氦離子之聚焦特性係不同於單一帶電離子之聚焦特性，並且出現在離子束192中的雙倍帶電離子可以導致樣本180上的較大光點大小及其他不合需要的效應。

減小離子束192中的中性粒子之總數的一種方法包含減小中性粒子將進入離子束的或然率。此方法可以包含(例如)使用於尖端186的引導氣體遞送(參見以上說明)以減少顯微鏡系統200中的未離子化氦氣體原子之總體出現。

減小離子束192中的中性粒子之總數的另一方法包含在中性粒子係出現在離子束192中之後從離子束移除中性粒子。此方法可以包含對偏轉離子使用靜電透鏡元件，從而在空間上分離離子光學130中的離子與中性粒子。例如，圖31顯示離子光學130，其中偏轉器220係與離子光學130之縱向軸線132偏移，並且其中置放一額外偏轉器223。氦離子束192包含氦離子192a與氦原子192b。為分離氦離子192a與氦原子192b，調整施加於偏轉器223的電位以引起氦離子192a在x-方向上的偏轉。氦原子192b不受偏轉器223的影響，並因此不會偏轉。隨後藉由集極1016截取氦原子192b，此舉防止氦原子192b穿過孔徑224。亦調整施加於偏轉器220及222的電位以便將氦離子192a之軌道與縱向軸線132重新對準，並且氦離子192a之一部分穿過孔徑224而且係入射在樣本180之表面181上作為離子束192。

其他技術亦可用於從離子束移除中性粒子。通常而言，此類技術包含使用電場/或磁場來偏轉離子束中的離子，而無需偏轉中性粒子。在某些具體實施例中，電場與磁場的組合可以用於補償由離子光學130中的離子偏轉所產生的離子之能量相依空間分離。另外，各種不對稱離子行幾何結構(例如彎曲離子行)可以用於分離氦原子及離子。

例如，在圖32中，離子光學130之彎曲行組態可以用於分離氦原子、單一帶電氦離子以及雙倍帶電氦離子。離子束192進入離子光學130，從而沿針對離子光學130之軸線132傾斜的方向傳播。離子束192包含中性氦原子、He^+離

子及He^{2+}離子。將電位施加於偏轉器223，從而偏轉離子束192中的He^{+}離子以便在穿過偏轉器223之後，He^{+}離子沿軸線132傳播作為離子束192a。然而，中性原子在穿過偏轉器223之後並未偏轉。中性原子因此係在空間上與He^{+}離子分離，從而提供藉由集極1016b所截取的中性原子束192b。將離子He^{2+}偏轉至比He^{+}離子更大的範圍，從而在空間上分離單一及雙倍帶電離子，並提供He^{2+}離子之離子束192c。藉由集極1016c截取He^{2+}離子束192c。因此，從離子光學130顯現的離子束192a實質上僅包含He^{+}離子。

圖33顯示用於分離氦原子、He^{+}離子及He^{2+}離子的離子光學系統之另一具體實施例。圖33所示的離子光學系統包含無分散序列的電場與磁場，其係用於彼此隔離氦原子、He^{+}離子及He^{2+}離子而且並向粒子束貢獻稜鏡狀效應。離子光學系統包含三個偏轉器223a、223b及223c之係列，其係配置成透過離子光學130偏轉並引導He^{+}離子以便實質上僅包含He^{+}離子的離子束192a從離子光學130顯現。中性原子束192b並未偏轉並且在每個偏轉器後的位置處藉由集極1016b加以截取。雙倍帶電氦離子比He^{+}離子得到更進一步的偏轉，並且多個He^{2+}離子束192c藉由集極1016c加以截取。因此，氦原子、He^{+}離子及He^{2+}離子係在空間上彼此分離，並且He^{+}離子係引導至樣本180作為離子束192，而不合需要的離子束組分係阻塞在離子光學130中。

在某些具體實施例中，磁場的使用可以導致離子束192中具有相同電荷，但是對應於藉由氣體來源110引入的氣

體之不同同位素的離子之軌道的空間分離。對於具有優勢自然出現的同位素(例如大於90%的相對豐度)之某些氣體(例如氦)而言，由於磁場引起的分離效應通常係較小。然而，對於具有二或更多個自然出現的同位素並缺乏優勢同位素的其他氣體而言，此類效應可以係較大。因此，在某些具體實施例中，可以使用同位素分離器(例如用於防止不合需要的同位素橫跨離子光學130之長度的區塊)。在某些具體實施例中，用於阻塞中性原子或雙倍帶電離子的集極1016也可以用於阻塞離子束192中的不必要之同位素。

粒子的類型

離子束與樣本的相互作用可以使不同類型的粒子透過如以下所說明的各種相互作用而離開表面。此類粒子包含二次電子、歐傑電子、散射離子、一次中性粒子、X射線光子、IR光子、可見光子、UV光子、二次離子與二次中性粒子。可以偵測並分析一或多種類型的粒子以決定關於樣本之一或多種類型的資訊。關於樣本的此類型資訊包含關於樣本之表面的地形資訊、關於樣本之表面的材料組分資訊、關於樣本之次表面區域的材料組分資訊、關於樣本的結晶資訊、關於樣本之表面的電壓對比度資訊、關於樣本之次表面區域的電壓對比度資訊、關於樣本的磁性資訊、以及關於樣本的光學資訊。本文使用的術語樣本之表面指最多達5 nm或更小之深度的積體。

A.二次電子

本文使用的二次電子係從一樣本物種發射並具有小於50

eV之能量的電子。一般而言，從樣本表面採用一定範圍的角度與能量發射二次電子。然而，最重要的資訊通常係二次電子之總豐度(與能量分解二次電子資訊或角度分解二次電子資訊相反)，因為，如以下所說明，二次電子之總豐度可以提供關於樣本表面的資訊。

可以使用能夠偵測電子的一或多個適當偵測器來偵測二次電子(參見以上關於偵測器之類型的說明)。若使用多個偵測器，則該等偵測器可以全部係相同類型的偵測器(或不同類型的偵測器可加以使用)並可一般按需要加以配置。偵測器可以配置成偵測離開樣本180之表面181(離子束撞擊的表面)、樣本180之表面183(離子束撞擊的表面之相反側上的表面)或兩者(參見以上關於偵測器的組態之說明)的二次電子。

偵測的二次電子信號可以用於形成樣本之影像。一般而言，在樣本之表面的視場內光柵掃描離子束，並且藉由一或多個偵測器測量每個光柵步驟中的二次電子信號(其對應於影像中的個別像素)。通常而言，於在樣本之表面的視場內光柵掃描離子束時，每個偵測器相對於樣本而保持在固定位置處。然而，在某些具體實施例中，可以相對於樣本移動一或多個偵測器。例如，若使用單一偵測器，相對於樣本移動偵測器可以產生關於樣本的角度相依資訊。

在某些具體實施例中，偵測二次電子之總豐度可以提供關於樣本之地形的資訊。表面上之給定位置處的二次電子總豐度一般取決於表面相對於該點處的離子束之斜率。一

般而言，在表面相對於離子束的斜率係較高之情況下(即，在如從表面法線測量的離子束之入射角係較大之情況下)，二次電子總豐度係較高。因此，與樣本之表面上的離子束之位置成函數關係的二次電子之總豐度方面的變化可與表面之斜率方面的變化關聯，從而提供關於樣本之表面之地形的資訊。

在某些具體實施例中，偵測二次電子之總豐度可以產生關於樣本的材料組分資訊(例如元素資訊、化學環境資訊)。在此類具體實施例中，資訊係主要與樣本之表面有關。一般而言，給定化學環境中的每個元素或材料將具有特定固有的二次電子產率。因此，表面上之給定位置處的二次電子總豐度一般取決於出現在該位置處的材料。因此，與樣本之表面上的離子束之位置成函數關係的二次電子之總豐度方面的變化可與出現在樣本之表面上的元素及/或材料方面的變化關聯，從而提供關於樣本之表面的材料組分資訊。在某些具體實施例中，可以根據自樣本的二次電子產率之數量測量而識別樣本中的特定材料。例如，諸如Al、Si、Ti、Fe、Ni、Pt及Au之材料於在受控條件下曝露於氦離子束時具有已知的二次電子產率。可以根據用於各種材料的已知二次電子產率來校準離子顯微鏡(例如氣體場離子顯微鏡)以識別處於研究之樣本中的各種不同材料之出現與相對豐度。例如，表I顯示用於各種材料的二次電子產率。該等產率係在氦離子束之垂直入射之情況下並採用21 keV之平均離子能量所測量。例如在非垂直入射

角情況下，表I所示產率係通常藉由一乘法因數依比例決定，該因數對應於樣本之表面上的離子束之入射角的切線。在下述對應範例中說明其他實驗條件。

表I

材料	Z	M(amu)	二次電子之產率
鋁	13	27.0	4.31
矽	14	28.1	2.38
鈦	22	47.9	3.65
鐵	26	55.8	3.55
鎳	28	58.7	4.14
銅	29	63.4	3.23
銦	49	114.8	4.69
鎢	74	183.8	2.69
銖	75	186.2	2.61
鉑	78	195.1	7.85
金	79	197.0	4.17
鉛	82	207.2	4.57

在某些具體實施例中，偵測二次電子之總豐度可以產生電壓對比度資訊，其依次可以提供關於導電率特性及/或元件之電位及/或樣本之表面上的材料之資訊。樣本之表面上之給定位置處的二次電子總豐度通常取決於出現在樣本之表面上的材料之電性特性。一般而言，較少的導電材

料將傾向於在隨時間曝露於離子束的同時隨時間變為帶正電，而較多的導電材料將不傾向於在曝露於離子束的同時隨時間變為帶正電。因此，例如樣本之表面上之給定位置處的二次電子總豐度將傾向於因沒有導電性的材料隨時間而減小(由於逃離樣本之較少二次電子產生的較多表面電荷)，同時較具有導電性的樣本之表面之給定位置處的二次電子總豐度將傾向於經歷二次電子總豐度隨時間的較小減小(由於較少表面電荷)。因此，與樣本表面上的離子束位置成函數關係的二次電子之總豐度方面的變化可與該位置處的材料之導電率關聯，從而提供關於樣本之表面的電壓對比度資訊。

可以藉由變為嵌入在樣本之次表面區域內的氬離子來提供次表面電壓對比度效應。如結合圖27A與27B所說明，次表面氬離子可以防止樣本中產生的二次電子逃離樣本表面。因此，樣本之二次電子影像中的對比度可能由於藉由入射氬離子提供的樣本之次表面電荷而引起。

藉由此等技術提供的資訊可以用於半導體粒子之離子束測試。例如，電壓對比度測量可以用於決定電性器件及/或電路之部分在曝露於離子束時是否由於該等部分之間的電性連接之出現或缺少而處於不同電位，且因此該等器件及/或電路是否係在正確地操作。

在某些具體實施例中，偵測二次電子之總豐度可以提供關於樣本之結晶資訊。二次電子之總豐度可以根據離子束是否與樣本之晶體結構對準(例如對準為平行於說明晶體

晶格的單位向量之一)而變動。若離子束係與樣本之晶體結構對準，則離子束中的離子一般可以滲入樣本中達到一給定距離而不經歷與樣本原子的碰撞(共同稱為通道)之或然率係相對較高，從而產生二次電子之較低總豐度。另一方面，若離子束並未與晶體結構對準，則離子束中的離子將具有滲入樣本中達到該給定距離而不經歷與樣本原子的碰撞之較低或然率，從而產生二次電子之較高總豐度。因此，與樣本表面上的離子束位置成函數關係的二次電子之總豐度可與該位置處的材料之結晶資訊關聯。例如，可以存在樣本表面之區域，其中二次電子之總豐度係實質上相同的。此類區域可以(例如)具有相同的晶體定位，並且區域之大小可以提供晶粒大小及/或晶體大小資訊(例如在包含多個定向結晶範圍之多晶樣本中)，及/或可以提供關於樣本(非晶或結晶樣本)之壓受區域的資訊，因為對於給定化學成分(例如元素成分、材料成分)之材料而言，二次電子總豐度之大小可以取決於材料之壓受力。

在某些具體實施例中，偵測二次電子之總豐度可以提供關於樣本之磁性資訊。二次電子之總豐度可以取決於鄰近於樣本表面的磁場之大小。例如，在某些具體實施例中，鄰近於樣本表面的磁場由於樣本內的磁疇而變動，該等磁疇在樣本表面上產生局部磁場。在某些具體實施例中，藉由外部磁場來源施加靜態磁場，並且樣本內的磁疇在樣本之表面上產生局部磁場，其在施加之外部磁場中引入變動。在任一情況下，樣本之表面上之局部磁場中的變動均

可以(例如)改變從樣本噴射的二次電子之軌道。當改變二次電子之軌道時二次電子軌道方面的變化可以對應於二次電子之總豐度方面的增加以便將更多二次電子引導至偵測器，或者當改變二次電子之軌道時二次電子軌道方面的變化可以對應於二次電子之總豐度方面的減小以便將更多二次電子從偵測器引導開。

對於某些範例而言，出現在樣本之二次電子影像中的對比度可以由於以上說明的二或更多種機制而引起。換言之，某些樣本之二次電子影像可以包含部分由於樣本表面中的地形變動、樣本表面中的材料組分變動、樣本表面中的電壓對比度變動、樣本表面中的結晶變動、及/或樣本表面中的磁性變化而引起的對比度。因此，可能有利的係將從測量二次電子總豐度得到的資訊與從測量其他類型之粒子得到的資訊組合以在品質及/或數量上隔離自此等機制之一或多個機制的貢獻。以下更詳細地說明此可行性。

二次電子成像技術可以應用於各種不同類別的樣本。此類類別的材料之一範例係半導體物件(例如圖案化晶圓)，其可以包含(例如)藉由絕緣材料之矩陣所包圍的多個電性導體。二次電子成像技術可以用於識別器件中的缺陷，例如導體之間不完全的電性連接、及/或電路元件之間的電性短路。更一般而言，二次電子成像技術可以用於半導體物件之較大範圍的離子束測試應用。可視需要地，可以基於光罩修復之目的而同樣地使用此方法。

二次電子成像技術可用於的樣本類別之另一範例係金屬

與合金。例如，包含混合材料(例如合金)的樣本之影像可以用於決定樣本中的材料之每個的表面分佈。其中可以使用二次電子成像技術的樣本類別之另一範例係用於資料儲存的讀取/寫入結構。其中可以使用二次電子成像技術的材料之類別之額外範例係生物材料及醫藥材料。

使用藉由曝露於氦離子束所產生的二次電子之成像樣本可以提供相對於經由其他技術(例如SEM)進行的二次電子成像之若干優點。例如，樣本上的氦離子束之光點大小可以小於自SEM的電子束之光點大小。因較小的光點大小，所以與SEM中的曝露區域相比，更仔細地控制曝露於氦離子束的樣本之區域。

此外，一般而言，因為氦離子係比電子重，所以散射事件並非如藉由散射來分散電子一樣在樣本內輕易地分散氦離子。因此，在比SEM中的電子小之相互作用體積中，入射在樣本之表面上的氦離子可與樣本相互作用。因此，在氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)中偵測的二次電子可以起於小於在具有類似光點大小之SEM中引起二次電子之區域的區域。因此，與在SEM中產生的二次電子相比，藉由氦離子束產生的二次電子可以對應於樣本之表面的更局部化的詢問(例如具有材料特徵之較小的橫向平均)。

另外，氦離子源亦提供比電子源大的聚焦深度。因此，與從SEM中的二次電子獲得的可比較影像相比，使用離子顯微鏡(例如氣體場離子顯微鏡)獲得的一樣本之影像可以顯示該樣本之一較大部分，其係沿垂直於樣本表面的方向

所測量並處於聚焦中。

與當由於電子束與樣本的相互作用而使二次電子離開表面時相比，當由於離子束與樣本的相互作用而使二次電子離開樣本時，由於用於不同材料之較大範圍的二次電子產率，所以氦離子束還可以提供用於樣本之二次電子影像的更敏感對比度機制。例如，通常而言，對於入射電子束而言，用於共同材料(例如半導體與金屬)的二次電子產率從0.5變動至2.5。然而，用於曝露於氦離子束的相同材料之二次電子產率可以從0.5變動至8。因此，使用氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)，可以比在可比較的SEM系統中更準確地執行自二次電子影像的不同材料之識別。

B.歐傑電子

本文使用的歐傑電子係如下產生的電子。移除一內殼原子電子以形成空穴，然後藉由自較高殼的第二原子電子隨能量之釋放來填充空穴。經由稱為歐傑電子的另一電子釋放此能量。一般而言，從樣本表面採用一定範圍的角度與能量發射歐傑電子。然而，最重要的資訊通常係歐傑電子之能量(與角度分解歐傑電子資訊相反)，因為如以下所說明，歐傑電子之能量可以提供關於樣本表面的資訊。可以使用能夠採用能量分解方式偵測電子的一或多個適當偵測器來偵測歐傑電子(參見以上關於偵測器之類型的說明)。若使用多個偵測器，則該等偵測器可以全部係相同類型的偵測器(或不同類型的偵測器可加以使用)並可一般按需要加以配置。偵測器可以配置成偵測離開樣本180之表面

181(離子束撞擊的表面)、樣本180之表面183(離子束撞擊的表面之相反側上的表面)或兩者(參見以上關於偵測器的組態之說明)的歐傑電子。為增強偵測的歐傑電子之信號對雜訊比，可能需要使用一偵測器，其可以收集歐傑電子之相對較大立體角。或者或另外，可以使用係鄰近於樣本表面並可將電子引導至偵測器的電子收集光學(例如靜電透鏡系統)(例如以增加用於歐傑電子的有效偵測立體角)。

一般而言，偵測歐傑電子之能量可以產生關於樣本的材料組分資訊(例如元素資訊、化學環境資訊)。在此類具體實施例中，資訊係主要與樣本之表面有關。一般而言，對於給定化學環境中的每個元素或材料而言，藉由元素或材料發射的歐傑電子將具有特定能量或能量之頻帶。因此，表面上之給定位置處的歐傑電子之能量一般取決於出現在該位置處的材料。因此，與樣本之表面上的離子束之位置成函數關係的歐傑電子之能量方面的變化可與出現在樣本之表面上的元素及/或材料方面的變化關聯，從而提供關於樣本之表面的材料組分資訊。

歐傑電子成像技術可以應用於各種不同類別的樣本。此類類別的材料之一範例係半導體物件(例如圖案化晶圓)，其可以包含(例如)藉由絕緣材料之矩陣所包圍的多個電性導體。可視需要地，可以基於光罩修復之目的而同樣地使用此方法。歐傑電子成像技術可用於的樣本類別之另一範例係金屬與合金。例如，包含混合材料(例如合金)的樣本之影像可以用於決定樣本中的材料之每個的表面分佈。其

中可以使用歐傑電子成像技術的樣本類別之另一範例係用於資料儲存的讀取/寫入結構。其中可以使用歐傑電子成像技術的材料之類別之額外範例係生物材料及醫藥材料。

使用由於樣本與氦離子束之相互作用而離開表面的歐傑電子之成像樣本可以提供相對於經由其他技術(例如SEM)進行的歐傑電子成像之若干優點。例如，樣本上的氦離子束之光點大小可以小於自SEM的電子束之光點大小。因較小的光點大小，所以與SEM中的曝露區域相比，更仔細地控制曝露於氦離子束的樣本之區域。

此外，一般而言，因為氦離子係比電子重，所以散射事件並非如藉由散射來分散電子一樣在樣本內輕易地分散氦離子。因此，在比SEM中的電子小之相互作用體積中，入射在樣本之表面上的氦離子可與樣本相互作用。因此，在氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)中偵測的歐傑電子可以起於小於在具有類似光點大小之SEM中引起歐傑電子之區域的區域。因此，與在SEM中產生的歐傑電子相比，由於樣本與氦離子束之相互作用而離開表面的歐傑電子可以對應於樣本之表面之更局部化的詢問(例如具有材料特性之較小橫向平均)。

另外，氦離子源亦提供比電子源大的聚焦深度。因此，與從SEM中的歐傑電子獲得的可比較影像相比，使用離子顯微鏡(例如氣體場離子顯微鏡)獲得的一樣本之影像可以顯示樣本之一較大部分，其係沿垂直於樣本表面的方向所測量並處於聚焦中。

對於歐傑電子偵測而言，使用與電子束相反的離子束之另一優點係當使用離子束時，在反向散射電子之基線上偵測歐傑電子；並且使用離子束，反向散射電子不會出現。因此，在收集相對較小數目之歐傑電子的同時，可以獲得偵測之歐傑電子的相對較高信號對雜訊比，此可以減小當使用離子束時從樣本獲得的相對較佳品質之歐傑電子光譜所花費的時間之數量。

C.散射離子

在保持一離子(例如一氦離子)的同時，當自離子束的一離子(例如一氦離子)與樣本相互作用時，產生本文使用的散射離子。因為一散射離子可以從一樣本之次表面區域行進至該樣本之表面並接著從該樣本加以發射的或然率係很低，所以散射離子一般提供關於該樣本之表面的資訊。如以下更詳細地說明，當偵測散射離子時，偵測器之特定配置一般取決於需要加以獲得的資訊之類型。

在某些具體實施例中，可以經由偵測的散射離子獲得關於一樣本表面之地形資訊。圖34A一般描述用於偵測自一表面的不同區域之散射離子以決定關於一樣本之表面的地形資訊的一方法之一具體實施例。特定言之，圖34A顯示一樣本7010，其具有區域7012、7014及7016，該等區域分別具有表面7013、7015及7017。當離子束係垂直入射在上面時，散射圖案7020、7030及7040分別表示從表面7013、7015及7017散射的離子之角度分佈。如圖34A所示，散射圖案7020、7030及7040之每個係餘弦型分佈。圖34B描述

分別藉由偵測器7041及7050偵測、起於地形效應的散射離子之相對強度7042及7052(分別為虛線及點線)的貢獻。因此，例如假定樣本7010係採用相同材料形成於其整個表面上，則自偵測器7041及7050的相對總豐度輪廓可以用於決定樣本7010之地形。或者，假定已知樣本7010之地形，則可以從偵測的散射離子之總豐度移除單獨由於地形(相對強度7042及7052)引起的對偵測之散射離子之總豐度的貢獻，以決定由於其他效應(例如橫跨樣本7010之表面的變化材料)引起的對總偵測之散射離子的貢獻。雖然可以按需要針對表面固定偵測器，但是在某些具體實施例中，對於圖34A所示的類型之偵測器系統而言，從在較大散射角情況下散射的氦離子獲得地形資訊。舉例而言，在某些具體實施例中，藉由偵測在相對於離子束之方向的60°或更大(例如65°或更大、70°或更大、75°或更大)之角度情況下散射的離子來決定自散射離子的地形資訊。雖然圖34A描述使用兩個偵測器，但是在某些具體實施例中使用單一偵測器(例如偵測器7041或偵測器7050)。或者在某些具體實施例中，可以使用兩個以上(例如三個、四個、五個、六個、七個、八個)的偵測器。一般而言，當多個偵測器係用於偵測散射離子時，該等偵測器係針對其相對於樣本之表面的立體角而彼此等距離隔開。使用針對樣本之表面而對稱地固定之兩個以上的偵測器(例如四個偵測器)可以允許偵測針對樣本表面之法線平面之兩個垂直方向上的表面特徵。

圖35A至35I一般描述用於偵測自一表面的不同區域之散射離子以決定關於一樣本之表面的地形資訊之方法的各具體實施例。特定言之，圖35A、35D及35G顯示一樣本8050，其具有區域8052、8054、8056及8058，該等區域分別具有表面8053、8055、8057、8059及8061。如圖35A、35D及35G所示，表面8055及8059係相對於表面8053、8057及8061而傾斜。當離子束係垂直入射在上面時，散射圖案8070、8090及80110分別表示從表面8053、8057及8061散射的離子之角度分佈。如圖35A、35D及35G所示，散射圖案8070、8090及80110之每個係餘弦型分佈。散射圖案8080及80100表示當離子束係針對區域8054及8058而垂直時從表面8055及8059散射的離子之角度分佈。如圖35A、35D及35G所示，因為離子束並非垂直入射在表面8055及8059上，所以散射圖案8080及80100之角度分佈並非餘弦型分佈。

圖35B及35C描述當將半球形偵測器(其能夠以角度方式分解散射離子、以光譜方式分解散射離子、或兩者)80120用於偵測散射離子時，散射離子之總產率及偵測的散射離子之相對豐度。如圖35C所示，當使用偵測器80120時，在偵測的離子之相對豐度方面存在陰影效應。因此，例如假定樣本8050係採用相同材料形成於其整個表面上，則自偵測器80120的相對總豐度輪廓可以用於決定樣本8050之地形。或者，假定已知樣本8050之地形，則可以從偵測的散射離子之總豐度中移除單獨由於地形(圖35D中的相對豐

度)引起的對偵測之散射離子之總豐度的貢獻，以決定由於其他效應(例如橫跨樣本8050之表面的變化材料)引起的對總偵測之散射離子的貢獻。

圖35E及35F描述當將具有用於散射離子的相對較小接受角之頂部偵測器80130用於偵測散射離子時，散射離子之總產率及偵測的散射離子之相對豐度。如圖35F所示，因為進入偵測器80130之接受角的散射產率在區域8054及8056中係實質上較小(不管下列事實：如圖35E所示，散射離子之總產率在此等區域中係較高)，所以散射離子之相對豐度在區域8054及8056中減小。因此，例如假定樣本8050係採用相同材料形成於其整個表面上，則自偵測器80130的相對總豐度輪廓可以用於決定樣本8050之地形。或者，假定已知樣本8050之地形，則可以從偵測的散射離子之總豐度中移除單獨由於地形(圖35D中的相對豐度)引起的對偵測之散射離子之總豐度的貢獻，以決定由於其他效應(例如橫跨樣本8050之表面的變化材料)引起的對總偵測之散射離子的貢獻。

圖35H及35I描述當將具有用於散射離子的相對較大接受角之頂部偵測器80140用於偵測散射離子時，散射離子之總產率及偵測的散射離子之相對豐度。如圖35I所示，藉由選擇偵測器80140之適當的接受角，偵測的散射離子之相對豐度橫跨樣本係實質上相同的。偵測的散射離子之總豐度方面的變化將係由於除表面地形方面之變化以外的效應(例如橫跨樣本8050之表面的變化材料)。

在某些具體實施例中，散射離子的偵測可以用於決定關於樣本之表面的材料組分資訊。一種此類方法包含測量散射離子之總豐度。可以使用配置成偵測離開樣本180之表面181(離子束撞擊的表面)的散射離子之單一偵測器(例如半球形偵測器)，或配置成偵測離開樣本180之表面181(離子束採用一定範圍的角度與能量撞擊的樣本表面)的散射離子之多個偵測器(例如定位在針對樣本之表面的不同立體角處)，偵測散射離子之總豐度。一般而言，氦離子之散射或然率(及因此散射氦離子之總豐度，假定沒有自其他因素的效應，例如表面樣本中的地形變化)係接近與表面原子(氦離子即從該表面原子散射)之原子序數的平方(Z數值)成比例。因此，舉例而言，當嘗試區分半導體物件中的銅(原子序數29)線與矽(原子序數14)時，自半導體物件之表面上的銅原子之散射氦離子之總豐度將接近為自半導體物件之表面上的矽原子之散射離子之總豐度的四倍。另外舉例而言，當嘗試區分半導體物件中的鎢(原子序數74)插頭與矽(原子序數14)時，自半導體物件之表面上的鎢原子之散射氦離子之總豐度將接近為自半導體物件之表面上的矽原子之散射離子之總豐度的25倍。另外舉例而言，當嘗試區分半導體物件中的金(原子序數79)區域與矽(原子序數14)時，自半導體物件之表面上的金原子之散射氦離子之總豐度將接近為自半導體物件之表面上的矽原子之散射離子之總豐度的25倍。另外舉例而言，當嘗試區分半導體物件中的銦(原子序數49)區域與矽(原子序數14)時，自

半導體物件之表面上的銦原子之散射氦離子之總豐度將接近為自半導體物件之表面上的矽原子之散射離子之總豐度的10倍。

用於藉由偵測散射氦離子(其可與總豐度偵測結合使用或代替總豐度偵測)而決定關於樣本之表面的材料組分資訊的另一方法包含採用能量分解及角度分解方式測量散射氦離子。例如，如圖36所示，第二透鏡226將氦離子束192聚焦於樣本180之表面181上。氦離子1102從表面181散射並藉由偵測器1100加以偵測。設計偵測器1100以便偵測器1100之接受角內的每個角度ε瞭解每個偵測的散射氦離子之角度與能量。藉由測量散射氦離子之能量與散射角，可以根據以下關係計算表面上對已散射之氦離子進行散射的原子之質量：

$$\frac{E_S}{E_i}=1-\frac{2M_{He}M_a}{(M_{He}+M_a)^2}(1-\cos\theta_S)$$

其中E_s係散射氦離子之能量，E_i係氦離子之入射能量，M_{He}係氦離子之質量，θ_s係散射角，以及M_a係對氦離子進行散射的原子之質量。

偵測器1100可以(例如)係能量分解以磷光體為基礎的偵測器、能量分解以閃爍物為基礎的偵測器、固態偵測器、能量分解以靜電稜鏡為基礎的偵測器、靜電稜鏡、能量分解ET偵測器、或能量分解微通道。一般而言，需要偵測器1100具有一實質合格的角度。在某些具體實施例中，偵測器1100係固定的(例如環形偵測器)。在某些具體實施例

中，偵測器1100可以掠過一定範圍的立體角。雖然已說明包含單一偵測器之用於偵測能量分解與角度分解散射氦離子的一系統，但是此類系統可以包含多個(例如二個、三個、四個、五個、六個、七個、八個)偵測器。通常而言，需要使用多個偵測器，因為此可以提供偵測的散射氦離子之較大接受角。

在某些具體實施例中，偵測散射氦離子之總豐度可以提供關於樣本之結晶資訊。散射氦離子之總豐度可以根據離子束是否與樣本之晶體結構對準而變動。若離子束係與樣本之晶體結構對準，則離子束中的離子一般可以滲入樣本中達一給定距離而不經歷與樣本原子的碰撞(共同稱為通道)之或然率係相對較高，從而產生散射氦離子之較低總豐度。另一方面，若離子束並未與晶體結構對準，則離子束中的離子將具有滲入樣本中達該給定距離而不經歷與樣本原子的碰撞之較低或然率，從而產生氦離子之較高總豐度。因此，與樣本表面上的離子束位置成函數關係的氦離子之總豐度可與該位置處的材料之結晶資訊關聯。例如可以存在樣本表面之區域，其中氦離子之總豐度係實質上相同的。此類區域可以(例如)具有相同的晶體定位，並且區域之大小可以提供晶粒大小及/或晶體大小資訊(例如在包含多個定向結晶範圍之多晶矽樣本中)，及/或可以提供關於樣本(非晶或結晶樣本)之壓受區域的資訊，因為對於給定化學成分(例如元素成分、材料成分)之材料而言，離散氦離子之總豐度之大小可以取決於材料之壓受力。

或者或另外，可以藉由將表面之一區域曝露於離子束(而不光柵掃描離子束)並接著測量散射氦離子之圖案(例如類似於由於自曝露於電子束的樣本表面之反向散射電子所獲得的菊池圖案)而獲得關於樣本之表面的結晶資訊。可以分析散射氦離子之圖案以決定(例如)曝露於離子束的樣本表面之位置處的材料之定位、晶格間距、及/或晶體類型(例如主體中心式立方體、表面中心式立方體)。

散射離子成像技術可以應用於各種不同類別的樣本。此類類別的材料之一範例係半導體物件(例如圖案化晶圓)，其可以包含(例如)藉由絕緣材料之矩陣所包圍的多個電性導體。散射離子成像技術可以用於識別器件中的缺陷，例如導體之間不完全的電性連接、及/或電路元件之間的電性短路。可視需要地，可以基於光罩修復之目的而同樣地使用此方法。散射離子成像技術可用於的樣本類別之另一範例係金屬與合金。例如，包含混合材料(例如合金)的樣本之影像可以用於決定樣本中的材料之每個的表面分佈。其中可以使用散射離子成像技術的樣本類別之另一範例係用於資料儲存的讀取/寫入結構。其中可以使用散射離子成像技術的材料之類別之額外範例係生物材料及醫藥材料。

一般而言，當將樣本表面曝露於傳統SEM中使用的類型之電子束時不會形成散射離子，且因此沒有可經由偵測的散射氦離子獲得之結晶資訊或材料組分資訊可用於此類SEM。此係如本文說明的氣體場離子顯微鏡(例如氦離子

顯微鏡)相對於傳統SEM之一重要優點。

使用如本文說明的氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)而測量散射氦離子可以提供相對於傳統拉塞福反向散射測量器件之若干優點。入射氦離子可以在樣本之表面上聚焦的光點大小可以在很大程度上小於傳統拉塞福反向散射測量器件之光點大小(100 μm至1 mm或更大之典型光點大小),從而提供關於比採用傳統拉塞福反向散射測量器件達到的表面精確地加以局部化之樣本表面的材料組分資訊。此外,如本文說明的氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)允許橫跨樣本表面逐像素進行光柵掃描,而拉塞福反向散射測量器件並沒有此能力。此可以減小表面之各位置處與關於樣本表面之材料組分資訊相關聯的成本及/或複雜性。

D.一次中性粒子

本文使用的一次中性粒子係當離子束與樣本相互作用並且自離子束的一離子(例如氦離子)離開樣本作為不帶電之中性粒子(例如不帶電之氦原子)時產生的中性粒子。與散射氦離子相反,一次氦原子係樣本之次表面區域的相對敏感探測。本文使用的次表面區域係一樣本之區域,其係在樣本表面下大於5 nm(例如在樣本表面下10 nm或更大、在樣本表面下25 nm或更大、在樣本表面下50 nm或更大),以及在樣本表面下1000 nm或更小(例如在樣本表面下500 nm或更小、在樣本表面下250 nm或更小、在樣本表面下100 nm或更小)。一般而言,離子束之探測深度隨離子之

能量的增加而增加。因此，為決定關於樣本的較深次表面資訊，可以使用較高能量離子束。可以藉由採用變動的離子束能量(探測深度)得到一樣本之多個氦原子影像來獲得材料組分資訊之深度輪廓。在某些具體實施例中，地形重建演算法及/或技術可以應用於深度相依資訊以執行樣本之結構的地形重建。

一般而言，使用總豐度偵測、能量分解/角度分解偵測或兩者，使用如以上針對用於散射氦離子之對應技術所說明的偵測器配置，以及還使用如以上說明用於散射氦離子的相同數學關係，可以決定基於一次氦原子之偵測的材料組分資訊。然而，通常而言，用於一次氦原子的偵測器能夠偵測中性物種。此類偵測器之範例包含微通道板、通道倍增器以及閃爍物/PMT偵測器。

一次中性粒子(例如氦原子)技術可以應用於各種不同類別的樣本。此類類別的材料之一範例係半導體物件(例如圖案化晶圓)，其可以包含(例如)藉由絕緣材料之矩陣所包圍的多個電性導體。一次中性粒子技術可以用於識別器件中的缺陷，例如導體之間不完全的電性連接、及/或電路元件之間的電性短路。可視需要地，可以基於光罩修復之目的而同樣地使用此方法。其中可使用一次中性粒子成像技術的樣本類別之另一範例係金屬與合金。例如，包含混合材料(例如合金)的樣本之影像可以用於決定樣本中的材料之每個的表面分佈。其中可以使用一次中性粒子成像技術的樣本類別之另一範例係用於資料儲存的讀取/寫入結

構。其中可以使用一次中性粒子成像技術的材料之類別之額外範例係生物材料及醫藥材料。

當將樣本表面曝露於傳統SEM中使用的類型之電子束時通常不會形成一次中性粒子，且因此沒有可經由偵測的散射氦離子獲得之結晶資訊或材料組分資訊可用於此類SEM。此係如本文說明的氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)相對於傳統SEM之一重要優點。

E.光子

重要的典型光子包含X射線光子、UV光子、可見光子及IR光子。本文使用的IR光子係具有大於700 nm至100,000 nm(例如從1.2×10^{-5} keV至1.7×10^{-3} keV)之波長的光子，可見光子係具有大於400 nm至700 nm(例如從1.8×10^{-3} keV至3×10^{-3} keV)之波長的光子，UV光子係具有大於10 nm至400 nm(例如從3.1×10^{-3} keV至125 eV)之波長的光子，以及X射線光子係具有從0.01 nm至10 nm(例如從125 eV至125 keV)之波長的光子。一般而言，此類光子係從樣本表面採用一定範圍的角度與能量/波長發射。然而，最重要的資訊通常係光子之波長及/或能量(與角度分解光子資訊相反)，因為如以下所說明，光子之波長及/或能量可以提供關於樣本表面的資訊。可以使用能夠採用波長分解或能量分解方式偵測光子的一或多個適當偵測器來偵測光子(參見以上關於偵測器之類型的說明)。若使用多個偵測器，則該等偵測器可以全部係相同類型的偵測器(或不同類型的偵測器可加以使用)並可一般按需要加以配置。偵測器

可以配置成偵測離開樣本180之表面181(離子束撞擊的表面)、樣本180之表面183(離子束撞擊的表面之相反側上的表面)或兩者(參見以上關於偵測器的組態之說明)的光子。為增強偵測的光子之信號對雜訊比，可能需要使用一偵測器，其可以收集光子之相對較大立體角。或者或另外，該系統可以包含一或多個光學元件(例如一或多個透鏡、一或多個反射鏡)，該等元件係鄰近於樣本之表面並可以將光子引導至偵測器(例如以增加偵測的光子之偵測的有效立體角)。

一般而言，偵測光子之能量及/或波長可以產生關於樣本的材料組分資訊(例如元素資訊、化學環境資訊)。在此類具體實施例中，資訊係主要與樣本之表面有關。一般而言，對於給定化學環境中的每個元件或材料而言，藉由元素或材料發射的光子將具有特定能量/能量之頻帶與波長/波長之頻帶。因此，從表面上之給定位置處發射的光子之能量及波長一般取決於出現在該位置處的材料。因此，與樣本之表面上的離子束之位置成函數關係的光子之能量或波長方面的變化可與出現在樣本之表面上的元素及/或材料方面的變化關聯，從而提供關於樣本之表面的材料組分資訊。

或者或另外，可以採用藉由決定樣本材料之去激發時間而偵測光子的方式獲得關於樣本的材料組分資訊。此可以(例如)藉由下列方式達到：對離子束施加脈衝以將樣本曝露於離子束達較短週期，然後測量偵測光子所花費的時間

之數量，此與發射光子的樣本材料之去激發時間有關。一般而言，給定化學環境中的每個元素或材料將具有特定去激發時間週期。

可以使用光子偵測結合極化器來獲得關於樣本的結晶資訊，因為光子的極化可以取決於樣本中的材料之晶體定位。因此，經由極化器之使用，可以決定藉由樣本發射的光子之極化，從而提供與樣本之晶體定位有關的資訊。

一般而言，偵測光子中包含的資訊將主要係關於樣本之表面的資訊。然而，因為光子可以從樣本之次表面區域逃離，所以偵測光子可以包含與樣本之次表面區域有關的資訊。因此，偵測光子可以用於決定樣本之光學特性。例如，樣本對光子的透明度可藉由下列方式加以調查：操縱離子束中的離子之能量，並因此操縱其探測深度，以及決定對偵測光子之強度的對應影響。與離子能量(探測深度)成函數關係的偵測光子強度可以產生關於樣本對光子的透明度之資訊。

光子成像技術可以應用於各種不同類別的樣本。此類類別的材料之一範例係半導體物件(例如圖案化晶圓)，其可以包含(例如)藉由絕緣材料之矩陣所包圍的多個電性導體。光子成像技術可以用於識別器件中的缺陷，例如導體之間不完全的電性連接、及/或電路元件之間的電性短路。可視需要地，可以基於光罩修復之目的而同樣地使用此方法。其中可以使用光子成像技術的樣本類別之另一範例係金屬與合金。例如，包含混合材料(例如合金)的樣本

之影像可以用於決定樣本中的材料之每個的表面分佈。其中可以使用光子成像技術的樣本類別之另一範例係用於資料儲存的讀取/寫入結構。其中可以使用光子成像技術的材料之類別之額外範例係生物材料及醫藥材料。

使用藉由曝露於氦離子束所產生的光子之成像樣本可以提供相對於經由其他技術(例如SEM)進行的光子成像之若干優點。例如，樣本上的氦離子束之光點大小可以小於自SEM的電子束之光點大小。因較小的光點大小，所以與SEM中的曝露區域相比，更仔細地控制曝露於氦離子束的樣本之區域。

此外，一般而言，因為氦離子係比電子重，所以散射事件並非如藉由散射來分散電子一樣在樣本內輕易地分散氦離子。因此，在比SEM中的電子小之相互作用體積中，入射在樣本之表面上的氦離子可與樣本相互作用。因此，在氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)中偵測的光子可以起於小於在具有類似光點大小之SEM中引起光子之區域的區域。因此，與在SEM中產生的光子相比，藉由樣本與氦離子束之相互作用產生的光子可以對應於樣本之表面之更局部化的詢問(例如具有材料特性之較小橫向平均)。

另外，氦離子源亦提供比電子源大的聚焦深度。因此，與從SEM中的光子獲得的可比較影像相比，使用離子顯微鏡(例如氣體場離子顯微鏡)獲得的一樣本之影像可以顯示樣本之一較大部分，其係沿垂直於樣本表面的方向所測量並處於聚焦中。

F.二次離子

本文使用的二次離子係當離子束與樣本相互作用以從帶電狀態中的樣本移除單原子或多原子物種時產生的離子。入射離子束與樣本之間的相互作用可以產生二次離子。通常而言，此方法係當使用大於氦的質量之惰性氣體離子(Ar離子、Ne離子、Kr離子、Xe離子)時更有效。

自樣本的二次離子之偵測可以經由偵測粒子的質量之計算而提供關於樣本的材料組分資訊。一般而言，此資訊將對應於樣本之表面上的材料。在某些具體實施例中，使用飛行時間與質量分解偵測器(例如四極質量光譜儀)的組合決定二次離子的質量。可以如下執行此類二次離子偵測。藉由改變施加於離子光學中的離子光學元件之電位，在脈衝模式中操作離子束。入射離子之脈衝係入射在樣本之表面上。決定切換離子光學元件電位以開啟並關閉離子束所採用的速率之一時脈信號還係用作用於偵測器的參考時間信號(參見以上關於偵測器的說明)。以此方式，可以準確地決定二次離子從樣本至偵測器的飛行時間。

根據偵測的二次離子之飛行時間、其行進的距離(例如偵測器與樣本之間的距離)及其能量，可以計算粒子的質量，並且可以識別化學物種(例如原子)的類型。此資訊係用於決定用於樣本的材料組分資訊。

二次離子成像技術可以應用於各種不同類別的樣本。此類類別的材料之一範例係半導體物件(例如圖案化晶圓)，其可以包含(例如)藉由絕緣材料之矩陣所包圍的多個電性

導體。二次離子成像技術可以用於識別器件中的缺陷，例如導體之間不完全的電性連接，及/或電路元件之間的電性短路。可視需要地，可以基於光罩修復之目的而同樣地使用此方法。其中可以使用二次離子成像技術的樣本類別之另一範例係金屬與合金。例如，包含混合材料(例如合金)的樣本之影像可以用於決定樣本中的材料之每個的表面分佈。其中可以使用二次離子成像技術的樣本類別之另一範例係用於資料儲存的讀取/寫入結構。其中可以使用二次離子成像技術的材料之類別之額外範例係生物材料及醫藥材料。

當將樣本表面曝露於傳統SEM中使用的類型之電子束時通常不會形成二次離子，且因此沒有可經由偵測的二次離子獲得之材料組分資訊可用於此類SEM。此係如本文說明的氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)相對於傳統SEM之一重要優點。

G.二次中性粒子

二次中性粒子係當離子束與樣本相互作用以從不帶電狀態中的樣本移除單原子或多原子物種時產生的中性粒子。入射離子束與樣本之間的相互作用可以產生二次中性粒子。通常而言，此方法係當使用大於氦的質量之惰性氣體離子(Ar離子、Ne離子、Kr離子、Xe離子)時更有效。一般而言，為存取可從二次中性粒子得到的資訊，在偵測之前離子化該等粒子(例如經由雷射引發式離子化、電子引發式離子化)。

自樣本的二次中性粒子(後離子化)之偵測可以經由偵測粒子的質量之計算而提供關於樣本的材料組分資訊。一般而言，此資訊將對應於樣本之表面上的材料。在某些具體實施例中，使用飛行時間與質量分解偵測器(例如四極質量光譜儀)的組合決定二次中性粒子(後離子化)的質量。可以如下執行此類二次中性粒子(後離子化)偵測。藉由改變施加於離子光學中的離子光學元件之電位，在脈衝模式中操作離子束。入射離子之脈衝係入射在樣本之表面上。決定切換離子化器件(例如雷射、電子束)及/或離子光學元件電位所採用的速率之一時脈信號還係用作用於偵測器的參考時間信號(參見以上關於偵測器的說明)。以此方式，可以準確地決定二次中性粒子(後離子化)從樣本至偵測器的飛行時間。

根據偵測的二次離子之飛行時間、其行進的距離(例如偵測器與樣本之間的距離)及其能量，可以計算粒子的質量，並且可以識別化學物種(例如原子)的類型。此資訊係用於決定用於樣本的材料組分資訊。

二次中性粒子成像技術可以應用於各種不同類別的樣本。此類類別的材料之一範例係半導體物件(例如圖案化晶圓)，其可以包含(例如)藉由絕緣材料之矩陣所包圍的多個電性導體。二次中性粒子成像技術可以用於識別器件中的缺陷，例如導體之間不完全的電性連接、及/或電路元件之間的電性短路。可視需要地，可以基於光罩修復之目的而同樣地使用此方法。其中可使用二次中性粒子成像技

術的樣本類別之另一範例係金屬與合金。例如，包含混合材料(例如合金)的樣本之影像可以用於決定樣本中的的材料之每個的表面分佈。其中可以使用二次中性粒子成像技術的樣本類別之另一範例係用於資料儲存的讀取/寫入結構。其中可以使用二次中性粒子成像技術的材料之類別之額外範例係生物材料及醫藥材料。

當將樣本表面曝露於傳統SEM中使用的類型之電子束時通常不會產生二次中性粒子，且因此沒有可經由偵測的二次中性粒子獲得之材料組分資訊可用於此類SEM。此係如本文說明的氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)相對於傳統SEM之一重要優點。

範例性應用

A.半導體製造

(1)概述

半導體製造一般涉及製備包括多個材料層之一物件，該等材料層依次沈積並處理以形成一積體電子電路、一積體電路元件及/或一不同微電子器件。此類物件一般包含各種特徵(例如，由導電材料所形成的電路線、填充不導電材料的井、由半導電材料所形成的區域)，該等特徵係相對於彼此精確定位(一般在數奈米範圍內的尺度上)。一給定特徵之位置、大小(長度、寬度、深度)、成分(化學成分)及相關特性(導電率、結晶定位、磁性特性)可重要地影響該物件之性能。例如，在特定實例中，若該些參數之一或多個參數在一適當範圍之外，則可能廢棄該物件，因為

其無法按期望起作用。因此，在半導體製造期間，一般需要極佳地控制各步驟，且較有利的係具有一工具，其可在製程中在各種步驟監控一半導體物件之製造以調查在半導體製程之各種階段之一或多個特徵之位置、大小、成分及相關特性。本文所使用的術語半導體物件係指一積體電子電路、一積體電路元件、一微電子器件或在製造一積體電子電路、一積體電路元件、一微電子器件之製程期間所形成的一物件。在某些具體實施例中，一半導體物件可以係一平板顯示器或一光伏打電池之一部分。

一半導體物件之多個區域可由不同類型的材料(導電、不導電、半導電)所形成。範例性導電材料包括金屬，例如鋁、鉻、鎳、鉭、鈦、鎢及包括該些金屬之一或多個金屬之合金(例如鋁銅合金)。範例性不導電材料包括該等金屬之一或多個金屬之硼化物、碳化物、氮化物、氧化物、磷化物、矽化物及硫化物(例如矽化鎳、硼化鉭、鍺化鉭、氮化鉭、矽化鉭、氮化矽鉭及氮化鈦)。範例性半導電材料包括矽、鍺及砷化鎵。視需要，可摻雜一半導電材料(p摻雜、n摻雜)以提高該材料之導電率。

如上所述，一般而言，一半導體物件製造涉及依次沈積並處理多個材料層。沈積/處理一給定材料層中的一般步驟包括成像物件(例如用以決定要形成之一所需特徵之位置)、沈積一適當材料(例如一導電材料、一半導電材料、一不導電材料)及蝕刻以從物件中的特定位置移除不必要的材料。通常，沈積一光阻(例如一聚合物光阻)/將其曝露

於適當輻射/選擇性地蝕刻以輔助控制一給定特徵之位置及大小。一般而言，採用一或多個後續處理步驟來移除該光阻，且一般情況下不期望最終的半導體物件包含可觀數量的光阻。

本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)可用於在製程中調查在不同步驟(例如各步驟)的一半導體物件。特定言之，藉由偵測並分析一類型的物件或多個不同類型的物件(如上所述)，該氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)可用於決定關於半導體物件表面之拓撲資訊、半導體物件表面之材料組成資訊、關於半導體物件之次表面區域之材料組成資訊、關於半導體物件之結晶資訊、關於半導體物件表面之電壓對比度資訊、關於樣本之一次表面區域之電壓對比度資訊、關於半導體物件之磁性資訊及/或關於半導體物件之光學資訊。

使用本文所述之一離子顯微鏡或離子束可提供各種不同優點，其一般可減小與半導體物件製造相關聯之時間、成本及/或複雜性。與使用本文所述之離子顯微鏡或離子束相關聯之範例性優點包括相對較高的解析度、相對較小的光點大小、相對較小的不期望的樣本損壞、相對較小的不期望的材料沈積及/或植入、在一相對較短時間週期內相對較高品質的成像、相對較高的產量。

在半導體製造中的特定處理步驟之範例如下所述。

(ii)無光罩微影術

一般使用涉及如下的一微影術製程來製備半導體物件：

將一光阻層(例如聚合物光阻，諸如聚(甲基丙烯酸甲酯)(PMMA)或以環氧樹脂為主的光阻、碳酸-二乙二醇酯、或感光玻璃)置於一表面上、圖案化該材料，使得該光阻之特定區域抗一蝕刻劑(而某些區域不抗一蝕刻劑)、蝕刻該材料之不蝕刻光阻區域、沈積適當材料(例如一或多個導電材料、一或多個不導電材料、一或多個半導電材料)、視需要地移除不需要的材料區域。一般而言，該圖案化步驟涉及曝露光阻於一適當波長的一輻射圖案下，使得該光阻之某些區域抗蝕刻而該光阻之其他區域不抗蝕刻。可藉由將一光罩之一影像形成於該光阻之上或使用一光罩覆蓋該光阻之特定區域，並透過該光罩曝露該光阻之該等未覆蓋區域來形成將該輻射圖案形成於該光阻之上。

然而，在曝露於輻射之前，不使用一光罩來覆蓋光阻之多個區域，可使用氣體原子與本文所述之氣體場離子源(例如氦離子源)之相互作用所產生的一離子束來照射以圖案化該光阻來產生所需抗蝕刻區域與不抗蝕刻區域。例如，藉由橫跨該光阻光柵掃描該離子束，使得所需材料區域係曝露於該等離子(例如藉由在需要將光阻曝露於輻射之區域開啟該離子束並在不需要將光阻曝露於輻射之區域關閉該離子束)，可實現此點。因此，可採用一無光罩製程來製造一半導體物件。

使用經由氣體原子與本文所述之氣體場離子源(例如氦離子源)之相互作用所產生之離子束可提供以下優點的一或多個優點。如所述，可不使用光罩來執行製程，從而可

減小與半導體物件製造相關聯的時間、成本及/或複雜性。該離子束之相對較大的聚焦深度可允許圖案化相對較厚的光阻材料(例如2 μm或更厚、5 μm或更厚、10 μm或更厚、或20 μm或更薄)。使用該離子束可實現的相對較深離子穿透深度可進一步輔助處理相對較厚的光阻材料以及輔助較好品質地處理更多標準厚度的光阻材料。此外，相對於電子束一般所實現的解析度，該離子束具有更高的解析度，從而允許更高精度地製造更小尺度的特徵。此外，離子束圖案化光阻可比電子束圖案化光阻更快。

(iii)離子顯微鏡及聚焦離子束之組合

一聚焦離子束(FIB)普遍用於一半導體物件之製造過程以獲得一樣本用於檢查。鎵(Ga)離子普遍用於FIB。可出於各種原因使用一FIB，例如透過一半導體物件之斷面成像、電路編輯、一半導體物件之失效分析、製備用於透射式電子顯微鏡(TEM)之一半導體物件物種及光罩修復。視需要，可使用一FIB將一或多個材料沈積於一樣本上(例如作為在一化學汽相沈積製程中的一離子源)。一般而言，該FIB係用於經由噴濺從一半導體物件移除材料。例如，在某些具體實施例中，該FIB係用於透過一半導體物件切片以曝露該物件之一斷面用於使用該離子顯微鏡進行後續成像。在特定具體實施例中，該FIB係用於將材料從一物件噴濺掉以在該物件中形成一渠溝或通孔。例如，此技術可用於曝露在該物件表面下面的多個物件部分。然後該離子顯微鏡可用於使用氣體輔助化學技術沈積新材料或蝕刻

掉該FIB所曝露之現有材料。在某些具體實施例中，一FIB還可用作一選擇性噴濺工具以移除一半導體物件之多個部分，例如在該物件上的導電材料之多個部分。在特定具體實施例中，一FIB用於切除一樣本之一部分，使得可後續分析該部分(例如使用TEM)。

一般需要在樣本上精確定位FIB。為此目的，可使用本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如一氦離子顯微鏡)。例如，可使用同時具有一FIB儀器及一氣體場離子顯微鏡之一交叉束工具，使得可使用該氣體場離子顯微鏡來決定該FIB之位置而不移動樣本。使用此工具，該氣體場離子源可用於成像樣本並提供可用於按需要精確定位該FIB之資訊。相對於使用一SEM來決定FIB位置，此類配置可提供許多優點。作為一範例，使用一SEM可導致相鄰樣本表面的一磁場，其可導致該等鎵離子之同位素分離，從而在樣本處導致多個FIB位置。在許多實例中，此問題導致串列使用FIB及SEM而不同時使用。然而，相比之下，一氣體場離子顯微鏡可在缺少此類磁場之情況下操作，藉此排除與鎵離子同位素分離相關聯之複雜性，同時還允許同時使用FIB與氣體場離子顯微鏡。例如，當製備一樣本用於後續檢查(例如用於TEM檢查)，其中可能需要該樣本厚度以滿足相對嚴格的容限時，可能需要此點。使用一氣體場離子顯微鏡(例如一氦離子顯微鏡)之一額外優點在於其具有比一SEM一般所使用的工作距離更長的一工作距離，同時仍維持極佳的解析度，因為離子束比電子束具有一更小的

虛擬來源。此點可緩輕可能針對組合一FIB儀器及一SEM之一工具所存在的特定間隔限制。本文所述之一氣體場離子顯微鏡之另一優點在於其可用於獲得關於一樣本之次表面資訊，從而可提高精確定位FIB之能力，而一SEM一般無法提供此類次表面資訊。

(iv)氣體輔助化學

氣體輔助化學普遍用於半導體製造過程用以向一給定層添加材料及/或從一給定層移除材料。例如，氣體輔助化學可用於半導體電路編輯，以修復半導體物件中所形成的損壞或不正確製造電路。氣體輔助化學還可用於光微影蝕刻光罩修復，其中可向光罩添加材料或從光罩移除材料以修復由於使用或不正確製造所引起的缺陷。

該製程一般涉及將電子與一活化氣體相互作用來形成一反應氣體，然後該氣體可參加在一半導體物件表面的化學以向該表面添加材料、從該表面移除材料或二者。一般而言，該等電子係作為由於一鎵離子束與樣本相互作用所引起之二次電子而產生及/或該等電子係作為由於一電子束(例如由一SEM所產生)與該樣本相互作用所引起之二次電子而產生。視需要，可使用一適當抽取系統來移除該表面化學之不期望的揮發性產品。

可用於從表面移除材料之活化氣體之範例包括Cl_2、O_2、I_2、XeF_2、F_2、CF_4及H_2O。作為一範例，在某些具體實施例中，藉由電子與Cl_2及/或O_2相互作用可至少部分地移除由鉻、氧化鉻、氮化鉻及/或氮氧化鉻所形成之一表

面區域，從而允許產生的化學物種蝕刻該表面區域。作為另一範例，在特定具體實施例中，藉由電子與XeF_2、F_2及/或CF_4相互作用可至少部分地移除由一氮化鉭所形成之一表面區域，從而允許產生的化學物種蝕刻該表面區域。作為另一範例，在特定具體實施例中，藉由電子與H_2O及/或O_2相互作用可至少部分地移除由一含碳材料所形成之一表面區域，從而允許產生的化學物種蝕刻該表面區域。

可用於在表面上沈積一材料之一活化氣體之一範例係WF_6(用以沈積W，例如一鎢插塞)。

氣體原子與本文所述之氣體場離子源(例如氦離子源)之相互作用所產生之一離子束可用於執行氣體輔助化學。例如，在此類製程中，由於離子束與樣本相互作用而離開樣本之二次電子可以係用於輔助該化學之電子。相對於使用一鎵離子束，使用此類離子束可提供數個優點。作為一範例，使用一氦離子束可減小(例如消除)不合需要的離子植入，而當使用一鎵離子束時不合需要的鎵植入係一普遍問題。作為另一範例，相對於一鎵離子束及/或一入射電子束(例如一SEM所產生之一入射電子束)，一氣體場離子束(例如一氦離子束)可提供改良的解析度，從而可允許更精確及/或可控制地使用該化學。例如，此點可減小(例如消除)離子與一樣本之特定部分不期望的相互作用(例如，此類情況可能發生於一鎵離子束，其中離子束輪廓具有延伸至樣本不期望區域之尾部，在該區域內鎵植入可能產生半導體物件性能問題。)。

(v)噴濺

在製造半導體物件製程中，在特定步驟期間可能需要移除材料。為此目的，可使用一離子束，其中該離子束從該樣本移除材料。特定言之，經由氣體原子與本文所述之氣體場離子源相互作用所產生之一離子束可用於噴濺一樣本。儘管可使用氦氣體離子，但一般較佳的係使用更重的離子(例如氖氣體離子、氬氣體離子、氪氣體離子、氙氣體離子)來移除材料。在移除材料期間，將該離子束聚焦於要移除材料所位於之樣本區域上面。

使用一離子束移除材料之一優點在於可採用一相對受控及/或精確方式移除材料。一額外優點在於可實現噴濺而沒有不期望的離子植入(例如當使用鎵離子噴濺時經常產生此類情況，其中鎵植入係一普遍不期望的噴濺副作用)。

(vi)偵測空洞

在製造一半導體物件期間，可能不適當地形成在特定特徵或層中的空洞。在某些具體實施例中，空洞可不期望地影響特徵及/或整體器件之特性(例如電氣、機械)。在特定具體實施例中，後續處理步驟可能會開啟空洞，而空洞可能(例如)填充液體及/或氣體成分。此點可能引起腐蝕下面結構、在周圍晶圓表面的粒子缺陷及/或殘餘缺陷。

作為一範例，在從WF_6沈積鎢插塞期間，一般使用一TiN_x保護層來保護一相鄰介電材料(例如硼及磷摻雜矽玻璃)不受腐蝕影響(例如不受在鎢形成期間所釋放的HF影

響)。在TiN_x層中的不連續性可導致明顯的空洞形成。作為另一範例，在渠溝(例如相對較高縱橫比的渠溝)中的材料(例如介電材料)沈積可能由於後續空洞形成而導致形成一瓶頸。作為一額外範例，空洞形成可發生於介電填充陰影渠溝隔離結構期間。作為另一範例，可在形成導電材料線(例如銅線)期間形成空洞，從而可能導致導電率不期望地減小。在某些情況下，此類空洞可能在需要導電率之地方導致導電率不足。

本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如一氦離子顯微鏡)可用於藉由利用其提供關於一樣本(例如一半導體物件)之次表面資訊之能力而調查空洞形成。此特性可用於半導體物件製程期間以決定空洞存在及/或位置。此點係超過使用一電子束的一不同優點，因為一電子束一般不會為一樣本提供此類次表面資訊。

(vii)覆蓋偏移對齊

覆蓋偏移對齊一般係指一半導體物件之一給定層之一特徵與該半導體層內的一特徵對齊。如上所述，一半導體物件之形成一般涉及適當形成許多層。一般而言，一半導體物件包含超過20個層以上。通常，各層可包含多個不同特徵，各特徵需要高精度地定位，使得半導體物件可適當起作用。作為一範例，一半導體物件可包含橫向特徵，例如導電電線，其處於不同層內並藉由一通孔相互連接。一般而言，需要在100 nm範圍內(例如75 nm、50 nm、25 nm、15 nm、10 nm、9 nm、8 nm、7 nm、6 nm、5 nm、4 nm、

3 nm、2 nm、1 nm)在半導體物件內使特徵相互對齊。該些許多特徵之一單一者之誤對齊可能導致整個半導體物件無用。

覆蓋偏移對齊一般使用光學技術(使用測試結構)來執行，該等測試結構係微米尺度的結構(明顯大於微電子電路特徵大小)。如此，一般無法將光學測試結構內部印染地放置於一晶圓上，由於其所佔據之晶圓空間數量。例如，可將該等測量結構更靠近晶圓邊緣放置，但其仍佔據晶圓表面上的有價值空間。光學測試結構還比較昂貴，因為其僅為對齊目的而製造。最後，使用光學測試結構用於對齊限制可用來決定對齊不同層內特徵之精度。

本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如一氦離子顯微鏡)相對較高精度地提供關於樣本之各種類型資訊(例如拓撲資訊、關於表面的材料組成資訊、關於一次表面區域的材料組成資訊、結晶資訊、關於表面的電壓對比度資訊、關於一次表面區域的電壓對比度資訊、磁性資訊及光學資訊)之能力允許該顯微鏡較有利地用於製造一半導體物件期間以輔助確保在該器件內適當並高精度地定位並尺寸調整該裝置內的該等特徵。特定言之，該氦離子顯微鏡可允許以比一般使用光學測試結構所獲得之解析度更高的解析度來對齊多個層中的電路特徵。此外，可不使用製造目的的測試結構(例如光學測試結構)來執行覆蓋偏移對齊，因為(例如)本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)可成像樣本(例如半導體物件)之次表面特徵。因此，可避免製

造目的測試結構(例如光學測試結構)在晶圓上所佔據之浪費空間以及與包括此類測試結構相關聯的相關聯成本及/或複雜性。

(viii)臨界尺寸度量

臨界尺寸度量係指測量可關鍵影響器件效能的一半導體物件中的線性特徵尺寸。此類特徵之範例可包括線(例如導電材料線、半導電材料線、不導電材料線)。一半導體物件可包含一或多個特徵，其大小尺寸為20 nm或更小(例如10 nm或更小、5 nm或更小、4 nm或更小、3 nm或更小、2 nm或更小、1 nm或更小)。在某些具體實施例中，多次測量特徵大小以提供關於該特徵尺寸的統計資訊。例如，臨界尺寸測量通常涉及(例如)決定一晶圓上的一圖案化特徵之長度。可從一製造線中隨機選擇晶圓(包含多個晶粒，每個晶粒形成一半導體物件)用於檢查，或可檢查該線上的所有晶圓。可使用一成像儀器來以一相當高輸出率來測量選定臨界尺寸。若測量的臨界尺寸不落入可接受限制內，則可能丟棄該晶圓。若源自一特定製造機器之多個樣本具有超出可接受限制之臨界尺寸，則可停機該機器，或變更其操作參數。

本文所述之氦離子顯微鏡系統可用於臨界尺寸測量。特定言之，可在一晶圓之一區域上光柵掃描氦離子束，並可使用所產生的晶圓影像來決定該(等)臨界尺寸。針對臨界尺寸測量，相對於SEM及其他檢查系統，氦離子顯微鏡系統可提供許多優點。比較相當的SEM影像，氦離子顯微鏡

影像一般展現更低的邊緣浮散(一般情況下，由於在斜率幾乎平行於離子束之拓撲特徵處的產率提高，過多信號接近偵測器之飽和點)。相對於電子與表面的相互作用體積，減小的邊緣浮散係由於氦離子與樣本表面更小的相互作用體積所引起。

此外，比較一相當的入射電子束，可聚焦入射氦離子至一更小光點大小。更小的離子束光點大小，組合更小的相互作用體積，導致樣本影像具有勝過使用SEM所產生之影像的解析度以及更精確地決定樣本之臨界尺寸。

比較一SEM，一氦離子束之聚焦深度相對較大。因此，比較一電子束，當使用一離子束時，在不同深度下的樣本特徵之解析度更加一致。因此，使用一離子束可以各種樣本深度提供比使用一電子束所能提供的更好且更一致的橫向解析度。作為一範例，使用一離子束可實現比使用一電子束所能實現的更好臨界尺寸輪廓。

此外，在至少部分基於二次電子獲得資訊之具體實施例中，比較一電子束，一離子束所提供的相對較高二次電子產率可為一給定電流產生一相對較高信號對雜訊比。此點可隨之允許在一相對較短時間段內獲得關於樣本之充分資訊，從而為一給定電流增加輸出。

可使用散射氦離子來執行為決定臨界尺寸成像樣本。除了高解析度的距離決定外，此點還提供材料資訊之添加優點。

在使用該等離子顯微鏡系統用於臨界尺寸測量期間，可

使用一流槍來防止樣本表面過多充電(參見上述)。或者或此外，可使用極低的氦離子束電流(例如100 fA或更小)。除了減小表面電荷並維持影像保真度外，使用低離子電流會減小離子束引發的特定光阻材料損壞。

在某些具體實施例中，針對臨界尺寸測量所選擇的晶圓樣本可能需要切割(例如用以測量樣本之一斷面尺寸)。為此目的，可在該離子顯微鏡中使用更重的氣體(例如氖及氬)來形成可用於切透樣本之一離子束。或者，可使用一以鎵為主的FIB來切割樣本。然後，可從該顯微鏡系統清除該些氣體並引入氦，使得使用一氦離子束進行臨界尺寸測量，從而避免在度量期間造成樣本損壞。

(ix)線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度

線邊緣粗糙度一般係指在一半導體物件中一材料線之邊緣粗糙度，而線寬度粗糙度一般係指在一半導體物件中一材料線之寬度粗糙度。可能需要理解該些值以決定實際或潛在問題是否存在於一給定半導體物件中。例如，若由導電材料所形成之相鄰線具有朝彼此向外突出的邊緣，則該等線可能相互接觸，從而導致短路。可能需要理解線邊緣粗糙度及/或線寬度粗糙度之尺寸應在5 nm或更小範圍內(例如4 nm或更小、3 nm或更小、2 nm或更小、1 nm或更小、0.9 nm或更小、0.8 nm或更小、0.7 nm或更小、0.6 nm或更小、0.5 nm或更小)。在某些具體實施例中，多次測量線邊緣粗糙度及/或線邊緣寬度以提供關於特徵大小之統計資訊。此外，針對參數(例如線邊緣粗糙度)之製造

容限可能極高。例如，可能須將半導體物件特徵之線邊緣粗糙度控制在5 nm或更小範圍內(例如在4 nm或更小範圍內、在3 nm或更小範圍內、在2 nm或更小範圍內、在1 nm或更小範圍內、在0.5 nm或更小範圍內、在0.1 nm或更小範圍內、在0.05 nm或更小範圍內、在0.01 nm或更小範圍內)。

當決定線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度時，可從一製造線隨機選擇晶圓用於檢查，或可檢查該線上的所有晶圓。可使用一成像儀器以一相對較高輸出率來測量線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度。若測量的線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度不落入可接受的限制內，則可能丟棄該晶圓。若源自一特定製造機器之多個樣本具有超出可接受限制之線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度，則可停機該機器，或可變更其操作參數。

本文所揭示之氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)可用於度量線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度。特定言之，可沿一特徵之長度光柵掃描氦離子束，並可使用所產生的資訊來相對高精度地決定線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度。

針對線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度測量，相對於SEM及其他檢查系統，氦離子顯微鏡系統可提供許多優點。比較相當的SEM影像，氦離子顯微鏡影像一般展現更低的邊緣浮散(一般情況下，由於在斜率幾乎平行於離子束之拓撲特徵處的產率提高，過多信號接近偵測器之飽和點)。相對於電子與表面的相互作用體積，減小的邊緣浮散係由於

氦離子與樣本表面更小的相互作用體積所引起。

此外，比較一相當入射電子束，可聚焦入射氦離子至一更小光點大小。更小的離子束光點大小，組合更小的相互作用體積，導致樣本影像具有勝過使用SEM所產生之影像之解析度以及更精確地決定樣本之線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度。

比較一SEM，一氦離子束之聚焦深度相對較大。因此，比較一電子束，當使用一離子束時，在不同深度下的樣本特徵之解析度更加一致。因此，使用一離子束可在各種樣本深度提供比使用一電子束所能提供的更好且更一致的橫向解析度。作為一範例，使用一離子束可實現比使用一電子束所能實現的更好線寬度輪廓。

此外，在至少部分基於二次電子獲得資訊之具體實施例中，比較一電子束，一離子束所提供的相對較高二次電子產率可為一給定電流產生一相對較高的信號對雜訊比。此點可隨之允許在一相對較短時間週期內獲得關於樣本之充分資訊，從而為一給定電流增加輸出。

可使用散射氦離子來執行為決定臨界尺寸成像樣本。除了高解析度的距離決定外，此點還提供材料資訊之添加優點。

在使用該等離子顯微鏡系統用於線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度測量測量期間，可使用一流槍來防止樣本表面過多充電(參見上述)。或者或此外，可使用極低的氦離子束電流(例如100 fA或更小)。除了減小表面電荷並維持影像保

真度外，使用低離子電流會減小離子束引發的特定光阻材料損壞。

在某些具體實施例中，針對線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度測量所選擇的晶圓樣本可能需要切割(例如用以測量樣本之一斷面尺寸)。為此目的，更重的氣體(例如氖及氬)可與一氣體場離子源相互作用來產生可用於切透樣本之一離子束。然後，可從該顯微鏡系統清除該些氣體並引入氦，使得使用一氦離子束進行臨界尺寸測量，從而避免在度量期間造成樣本損壞。

(x)電路編輯

如先前所述，形成一半導體物件之製程一般涉及採用一所需方式堆疊許多不同材料層及在各層上執行適當製程。一般而言，此點涉及沈積材料於一給定層上及/或從一給定層移除材料。最終的半導體物件包括在不同層內的許多不同特徵(例如以形成一所需電路)。一般而言，需要正確對齊該等特徵使最終器件按期望起作用。對齊標記係普遍用於半導體物件內以輔助對齊一給定層內的特徵與一不同層內的特徵。然而，使用對齊標記可能給整體製程添加額外的步驟及/或可能給製程引入其他的複雜性或費用。此外，對齊標記之存在起碼表明存在不可使用(例如用於製造主動組件)的半導體物件之面積及/或體積。

如上所述，可使用一離子束來調查一材料之次表面區域。可使用此特性來決定在一表面層下面之一層內的特定特徵之位置，從而允許在半導體物件之不同層內的特徵按

期望對齊而不使用對齊標記。

本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)可用於使用(例如)上述氣體輔助化學及/或噴濺技術來(例如從一電路)移除及/或沈積材料。使用一離子顯微鏡來執行該些製程之一優點在於離子束還可用於評估產生的產品以決定(例如)是否適當沈積或移除所需材料。此點可減小器件製造相關聯的成本及/或複雜性，及/或增加器件製造之產量。可組合移除及/或添加材料能力來執行次表面電路修復。為了修復一次表面缺陷，先移除來自器件之材料至一曝露該缺陷之深度。然後藉由向該器件添加或從該裝置移除材料來修復該缺陷。最後，藉由添加適當厚度的新材料來逐層修復該器件之上面層。

本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)可為電路編輯應用提供特定優點，包括較小的光點大小及較低的離子電流用於控制並高度精確地編輯製造的器件。

(xi)光罩修復

一般使用涉及如下之一微影蝕刻製程來製備半導體物件：將一光阻層(例如聚合物光阻，諸如聚(甲基丙烯酸甲酯)(PMMA)或以環氧為主的光阻、碳酸-二乙二醇酯、或感光玻璃)置於一表面上、圖案化該材料，使得該光阻之特定區域抗一蝕刻劑(而某些區域不抗一蝕刻劑)、蝕刻該材料之不蝕刻光阻區域、沈積適當材料(例如一或多個導電材料、一或多個不導電材料、一或多個半導電材料)、及視需要地移除不合需要的材料區域。一般而言，該圖案

化步驟涉及曝露光阻於一適當波長的一輻射圖案，使得該光阻之某些區域抗蝕刻而該光阻之其他區域不抗蝕刻。可藉由將一光罩之一影像形成於該光阻上或使用一光罩覆蓋該光阻之特定區域，並透過該光罩曝露該光阻之該等未覆蓋區域來形成將該輻射圖案形成於該光阻之上。

用於在半導體產業中製造積體電路及其他微電子器件之光微影蝕刻光罩可能較脆弱及/或較昂貴。此外，光罩製程可能較耗時間及/或較精密。在某些情況下，儘管在此類光罩製造期間一般較小心，但製造誤差會產生光罩缺陷。在其他情況下，光罩缺陷可能由於處理及一般使用所引起。若使用該等有缺陷光罩來產生電路或其他器件，則該等電路或器件可能不會正確操作。假定製造一新光罩所需之時間及費用，可能編輯一有缺陷光罩比製造一全新光罩更具成本效用。

光罩缺陷一般包括在應沒有任何材料之一光罩區域內光罩材料過多及/或應存在材料的地方光罩材料不足。在任一情形下，可使用本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)來檢查及/或修復一光罩。

在某些具體實施例中，可使用本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)來檢查光罩以決定一缺陷是否存在且若一缺陷存在，則決定缺陷位置。本文所揭示之氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)所提供之各種有利特徵之許多特徵均合需要地用於成像光罩。

在特定具體實施例中，除了在光罩修復期間成像光罩之

外，該氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)可用於修復製程期間。作為一範例，可使用該氣體場顯微鏡來相對於一FIB定位光罩，使得該FIB可用於使用諸如上述之氣體表面化學製程及/或蝕刻製程來從光罩添加及/或移除材料。作為另一範例，除了最初成像光罩以決定一缺陷之存在及/或位置外，該氣體場離子顯微鏡可用於使用諸如上述之氣體表面化學製程及/或蝕刻製程來向光罩添加及/或從光罩移除材料。視需要，該氣體場離子顯微鏡可用於進行特定修復步驟(添加材料、移除材料)，而另一儀器(例如一FIB)用於進行氣體修復步驟(添加材料、移除材料)。

(xii)缺陷檢查

一般而言，在製造一半導體物件之製程期間，會針對潛在缺陷，檢查該物件。一般而言，使用一線上工具來執行該檢查，該線上工具始終運行並被饋給晶圓且完全自動。該工具經常用於檢查一較小面積的晶圓是否存在出現一缺陷之區域。在缺陷檢視之前執行此檢查(參見下述)。相對於決定一給定缺陷之確切本質，缺陷檢查之目標一般係決定一缺陷是否存在。在缺陷檢查期間，分析一晶圓之一區域以相對於相同晶圓之其他區域及/或其他晶圓區域查看樣本是否展現特定反常特性(例如電壓對比度特性、拓撲特性、材料特性)。一般而言，對於一潛在缺陷，記錄在晶圓上的座標(例如X、Y座標)，並在缺陷檢視期間更仔細地檢查該晶圓之位置。

本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如一氦離子束)可用於

在缺陷檢查期間收集關於一樣本之資訊。可使用此類顯微鏡以獲得相對較高的產量及較高品質的缺陷檢查。該氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)所提供之不同對比度機制可允許視覺化不同類型的缺陷並採用比使用光學成像技術一般可觀察到的更高解析度。

(xiii)缺陷檢視

一般而言，若在缺陷檢查期間記錄一樣本為具有一潛在缺陷，則該樣本經受缺陷檢視，其中調查具有潛在缺陷之樣本特定區域以決定該缺陷之本質。基於此資訊，可實施修改製程以減小最終產品中的缺陷風險。一般而言，以比缺陷檢視更慢的速度及更高的放大倍率來進行缺陷檢查，並可自動化或手動進行以獲得關於一或多個缺陷之具體資訊。使用該資訊來嘗試理解在缺陷檢視期間獲得反常結果之原因及引起該等反常結果之該等缺陷之本質及原因。

本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)可用於在製程期間在各種步驟(例如每一步驟)調查一半導體物件。特定言之，藉由偵測及分析一類型的物件或多個不同類型的物件(如上所述)，該氣體場離子顯微鏡(例如氦離子顯微鏡)可用於決定關於半導體物件表面之拓撲資訊、半導體物件表面之材料組成資訊、關於半導體物件之次表面區域之材料組成資訊、關於半導體物件之結晶資訊、關於半導體物件表面之電壓對比度資訊、關於半導體物件之一次表面區域之電壓對比度資訊、關於半導體物件之磁性資訊及/或關於半導體物件之光學資訊。該氦離子顯微鏡所

提供之不同對比度機制可允許視覺化使用以SEM為主技術不會顯現的缺陷。

使用本文所述之離子顯微鏡或離子束可提供各種優點，其一般可減小與半導體物件製造相關聯之時間、成本及/或複雜性。與使用本文所述之離子顯微鏡或離子束相關聯的範例性優點包括相對較高的解析度、相對較小的光點大小、相對較小的不期望的樣本損壞、相對較小的不期望的材料沈積/或植入、在相對較短時間週期內相對較高品質的成像、相對較高的產量。

(xiv)電路測試

在製造一半導體物件期間，可測試該物件之一或多個特徵之導電率及功能性。此製程一般涉及將該(等)特徵曝露於充電粒子，然後監控電荷累積之速率。相對於一閉路，一開路將以一不同的速率充電，從而允許識別並考量一開路用於更詳細的檢查。本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如一氦離子顯微鏡)可用於使用離子束向特徵施加電荷及/或可用於監控是否已洩漏掉電荷(例如藉由監控電壓對比度特徵)。視需要，一流槍可用於施加電荷(參見下述)，且該氣體場離子顯微鏡可用於監控電荷是否已洩漏掉(例如藉由監控電壓對比度特徵)。

B.金屬及合金腐蝕

氦離子顯微鏡可用於識別並檢查各種器件及材料中的金屬腐蝕。例如，用於核電站、軍事應用及生物醫藥應用之金屬固定件及器件可能由於配置其之惡劣環境而受到腐

蝕。氦離子顯微鏡可用於基於在該等器件中的氫(H)(其用作可靠的腐蝕指示器)之相對豐度來構造該些及其他器件之影像。

一般而言，為了基於散射氦離子或原子來構造影像，相對於一入射氦離子束，將用於該些離子或原子之一偵測器定位於一樣本之背側。曝露該樣本於氦離子在該樣本內產生散射氫原子及離子，且可偵測並使用該些散射氫原子及離子來構建該樣本之影像。然後可使用該等氫豐度影像來評估該影像內的腐蝕程度。該氦離子束之較小光點大小及相互作用體積可導致獲得樣本之高解析度氫影像而不損壞樣本。

C.用於資料儲存之讀取/寫入結構

用於磁性儲存器件(例如硬碟)之讀取/寫入頭係以極高容限制造且在安裝之前必須檢查製造缺陷。該些器件經常具有極高的縱橫比；此類裝置之較短側可能小至1 nm。當在檢查期間用於成像該些器件時，氦離子顯微鏡提供許多優點。在該些優點之中係較小的光點大小及相互作用體積，其可導致較高解析度地成像該些微小器件、一較大的聚焦深度，其可允許沿裝置較長尺寸聚焦成像整個高縱橫比裝置、及測量散射氦離子及/或中性原子所提供之材料資訊，其用於確認是否適當連接微小電路元件。

D.生物技術

通常需要使用一非毀滅性技術來決定關於一生物樣本之元素及/或化學成分資訊。生物樣本之範例包括組織、核

酸、蛋白質、碳水化合物、脂質及細胞膜。

本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如一氦離子顯微鏡)可用於決定(例如)關於一生物樣本之拓撲資訊、一生物樣本之一表面之材料組成資訊、關於一生物樣本之次表面區域之材料組成資訊及/或關於一生物樣本之結晶資訊。例如，該氣體場離子顯微鏡可用於成像免疫標注細胞及內部細胞結構。可依此方式使用該顯微鏡，同時提供本文所述之特定優點。

E.醫藥

通常，一治療藥物(例如小分子藥物)會形成為一晶體(例如當其析出溶液時)。可能需要決定該結晶的小分子之結晶結構，因為此結構可(例如)提供關於該小分子之水合程度之資訊，其隨之可提供關於該小分子之生物利用度之資訊。在特定範例中，該結晶資訊可最終演示該小分子實際上處於一非晶(相對於結晶)形式，該非晶形式亦可影響該小分子之生物利用度。

此外或替代性，通常需要使用一非毀滅性技術來決定關於一生物樣本之元素及/或化學成分資訊。

本文所述之氣體場離子顯微鏡(例如一氦離子顯微鏡)可用於決定(例如)關於一生物樣本之拓撲資訊、一生物樣本之一表面之材料組成資訊、關於一生物樣本之次表面區域之材料組成資訊及/或關於一生物樣本之結晶資訊。可依此方式使用該顯微鏡，同時提供本文所述之特定優點。

電腦硬體及軟體

一般而言，可採用電腦硬體或軟體或二者組合來實施上述該等分析方法之任一方法。可使用遵照本文所述之方法及圖示之標準程式化技術來採用電腦程式實施該等方法。可施加程式碼來輸入資料以執行本文所述之功能並產生輸出資訊。將輸出資訊施加至一或多個輸出器件，例如一顯示監視器。每個程式可使用高階程序性或物件導向程式語言來實施以與一電腦系統通信。然而，需要時，可採用匯編或機器語言來實施該等程式。在任一情況下，該語言可以係一編譯或翻譯語言。而且，為該目的，該程式可在預程式化的專用積體電路上運行。

較佳的係將各此類電腦程式儲存於一通用或專用可程式化電腦可讀取之一儲存媒體或器件(例如ROM或磁碟)上，用於當該電腦讀取該儲存媒體或器件時配置並操作該電腦以執行本文所述之程序。該電腦程式還可在程式執行期間駐留於快取或主記憶體內。該等分析方法還可實施為一電腦可讀取儲存媒體，配置一電腦程式，其中如此配置的儲存媒體引起一電腦以一專用且預定義方式操作以執行本文所述之功能。

其他具體實施例

儘管已說明特定具體實施例，但其他具體實施例亦可行。

作為一範例，一SEM可組合一氣體場離子顯微鏡用於該等前述具體實施例之一或多個具體實施例。例如，一SEM可用於產生二次電子、歐傑電子、X射線光子、IR光子、

可見光光子及/或UV光子。視需要，可使用一SEM來促進氣體輔助化學。可採用本文所述之該等操作模式之任一模式來配置該氣體場離子顯微鏡，使得該SEM及該氣體場離子顯微鏡執行互補性功能。

作為另一範例，儘管已揭示一W(111)尖端，但鎢的不同結晶定位還可用於一尖端。例如，可使用一W(112)、W(110)或W(100)尖端。

作為另一範例，在某些具體實施例中，該離子顯微鏡(例如氣體場離子顯微鏡)可包括適當組件以允許線上使用該顯微鏡用於分析樣本，例如與半導體產業相關的樣本(例如晶圓樣本)。例如，在特定具體實施例中，可使用用於標準大小半導體晶圓的一高速承載器來自動化該離子顯微鏡。在某些具體實施例中，該系統可包括一晶圓台，其能夠高速地將一晶圓之一部分放置於該離子顯微鏡下面。該離子顯微鏡還可包括一掃描系統，其能夠高速光柵掃描度量圖案。視需要，該離子顯微鏡還可包括一電荷中性化方案以減小樣本充電。該離子顯微鏡還可包括一晶圓高度控制模組，用於調整工作距離。在特定具體實施例中，可配置該系統，使得可成像個別晶粒(例如長度在50 mm的級別上)。

範例

下列範例係說明性而非用於限制性。

1.

由單晶W(111)(直徑250 μm)所形成的一25 mm長發射器

導線係購自FEI公司(奧勒崗州Hillsboro市)。將該發射器導線修整至一3 mm長度並放置一旁。按如下製備一V形加熱器導線。一13 mm長多晶鎢導線(直徑180 μm)係購自Goodfellow公司(賓夕法尼亞州Devon市)並在蒸餾水中藉由聲裂法清洗15分鐘，以移除碳殘餘物及其他雜質。將該導線在其中點彎曲以形成一115度角度。在「V」頂點附近的區域係電化學蝕刻以準備讓其在1 V，頻率60 Hz的一施加交流電位下，在一1 N氫氧化鈉(NaOH)水溶液中焊接持續大約15秒。然後從該蝕刻溶液取出該加熱器導線，使用蒸餾水沖洗，然後乾燥。

該V形加熱器導線係固定於一固定件內以確保該等導線末端維持共面。將該發射器導線點焊至該加熱器導線之V形頂點。然後，將該加熱器導線之兩末端點焊至如圖11A及11B所示類型的一支撐基座之二支柱。該支撐基座係購自AEI公司(加利福尼亞州Irvine市)。然後在蒸餾水中採用超音波清洗所產生的裝配件並乾燥。

在將該發射器導線固定於該支撐基座上並清洗該支撐基座之後，按如下，藉由一電化學製程來蝕刻該發射器導線之末端。首先，將一光阻材料(例如購自紐約州紐約市的Revlon公司的指甲油)施加至一0.5 mm長發射器導線，從該導線之自由端開始。將一滴光阻放置於一清淨玻璃顯微鏡載玻片表面上，並將該導線浸入該光阻溶液十次，允許光阻在每次浸漬之間輕微乾燥。注意確保該光阻之上邊界為一圓形形狀，且保持該圓形平面垂直於該導線軸。在最

後一次將該發射器導線末端浸入該光阻材料之後，讓該導線在空氣中乾燥1小時。

然後將附著光阻塗布發射器導線之支撐基座附著至一蝕刻固定件，其包括：(a)一轉移裝置，其用於垂直平移該支撐基座；(b)一圓盤；及(c)一反向電極，其係由不銹鋼形成，以最小化不合需要的化學反應，其延伸至該圓盤內。該圓盤充滿一蝕刻溶液至一位準，使得該溶液接觸該反向電極。大約150 mL的溶液係存在於該蝕刻固定件圓盤內。該支撐基座之定位係調整成用以確保該發射器導線之縱軸大約平行於垂直方向(例如該轉移裝置沿其用於平移該支撐基座之方向)。然後，使用該轉移裝置朝該圓盤降低該支撐基座，直至曝露的發射器導線恰好接觸該蝕刻溶液。固定於該蝕刻固定件的一高放大倍率相機允許容易地看見光阻層及蝕刻溶液表面，並允許相對於該溶液表面精確定位該發射器導線。

然後，該導線係再降低0.2 mm，進入該蝕刻溶液內。在此位置，該發射器導線之光阻塗布部分完全浸入蝕刻溶液內。

該蝕刻溶液由150 mL的2.5 M NaOH水溶液組成。為了促進濕潤，將一滴表面活性劑(PhotoFlo 200，購自紐約州Rochester市Eastman Kodak公司)添加至該蝕刻溶液。在該蝕刻製程期間還採用使用一磁力攪拌器輕輕攪拌該蝕刻溶液。

一外部電源係連接至該等支撐基座支柱及該反向電極。

可控制該外部電源之電壓最大振幅、脈衝持續時間及波形形狀，以在該蝕刻固定件內提供特定的蝕刻條件。

將60 Hz頻率的一交流脈衝序列施加至該發射器導線，以促進該電化學蝕刻製程。首先，在5分鐘的一總時間窗口期間，施加持續時間580 ms、振幅10 V的一百個脈衝。該等施加脈衝之效應在於增加蝕刻製程之速率。開始蝕刻掉浸入溶液內但未覆蓋光阻材料之多個發射器導線部分。因為該發射器導線係定位使得在該光阻材料邊緣上面的該導線之僅一較小未塗布區域浸入溶液內，故觀察到在此區域內局部蝕刻該發射器導線。隨著電化學反應進行，在此區域內的導線直徑由於該蝕刻製程而開始變得越來越狹窄。

接著，將該外部電源之脈衝持續時間調整成325 ms，並在5分鐘的一總時間窗口期間，將此持續時間的六十個脈衝施加至該發射器導線。該些脈衝進一步促進該電化學蝕刻製程，從而造成該發射器導線之一蝕刻區域具有極小的直徑。

最後，將該外部電源之脈衝持續時間調整成35 ms，並將個別脈衝施加至該發射器導線，直至蝕刻完成，該發射器導線之光阻塗布部分掉入該蝕刻溶液內。然後從該蝕刻固定件移除該支撐基座，使用蒸餾水進行沖洗，並在一氮氣流下進行乾燥。

使用一SEM檢查仍然附著至該支撐基座之發射器導線以確認蝕刻尖端是否具有適當幾何特徵。在5 keV下操作並

且探針大小為3 nm的一AMRAY型號1860 SEM係用於成像該發射器導線尖端。在配備一傾斜及旋轉手動台的一樣本操縱器上，將該支撐基座安裝於該SEM之一樣本區域內。從數個不同觀察角度與放大倍率來獲得該來源之影像以確認該尖端是否大約正確成形。

然後使用該等SEM影像來特徵化平均全錐角、平均尖端半徑及平均圓錐方向，如該導線之尖端頂點先前所述。用於該些測量之該等影像係採用65,000 X的一放大倍率並沿與該發射器導線軸直角定向的一視軸來攝取。使用該SEM樣本操縱器來調整該發射器導線傾斜度，以確保該發射器導線相對於該視軸正交定向。為了平均測量尖端錐角、圓錐方向及半徑，使用該SEM樣本操縱器在連續影像之間旋轉該尖端45°(圍繞該發射器導線軸)。此點產生一組八個尖端影像，各從一不同角度，然後使用該等影像來決定該尖端之錐角、曲率半徑及圓錐方向。

圖37A至37D中顯示該等八個透視影像之四個影像。該等SEM影像之各影像係數位化成點陣圖格式，然後使用自訂演算法來加以分析，該自訂演算法係使用MathCAD軟體套件(麻塞諸塞州Needham市PTC Inc.公司)所開發。首先，該等影像之各影像係藉由施加一高斯捲積演算法來加以平滑以減小影像雜訊，尤其係在成像期間由於SEM振動所引起的雜訊。然後將基於一臨界強度值的一濾波步驟施加至該等影像之各影像以強化該鎢尖端與黑色背景之間的邊界。然後將在各影像中的尖端邊界決定為非零強度點

(X,Y)集合，其在對應於該尖端之像素與對應於黑色(例如零強度)背景之影像像素之間形成一分界線。針對該等尖端圖示之一者的此類點(X,Y)集合如圖38所示。針對該等八個尖端透視圖之各透視圖決定類似邊界點集合。

在計算一給定邊界曲線之斜率之前，將一平滑演算法施加至該曲線以確保該曲線之局部斜率對於雜訊及其他較小信號變更相對不敏感。該平滑演算法由將該等原始資料點(X,Y)代入一四次多項式，已發現該四次多項式又用於說明該尖端之形狀。該平滑演算法之效應在於確保在頂點位置任一側，此曲線之第一導數不過分受到較小形狀變更影響。

在該平滑步驟之後，使用一有限差分演算法沿針對各圖示的邊界曲線在各X點計算斜率dY/dX。圖39顯示針對圖38所示之邊界曲線，沿該邊界曲線多個點計算的斜率作為X之一函數的一曲線圖。

對於一特定尖端圖示，在對應於該圖示之邊界曲線上斜率獲得一零值之位置係識別為尖端頂點並賦予標注X_{apex}。最靠近該尖端頂點，在對應於點(X,Y)之邊界曲線上邊界曲線斜率獲得值1的位置係賦予標注X_{+1}。最靠近該尖端頂點，在對應於點(X,Y)之邊界曲線上邊界曲線斜率獲得值-1的位置係賦予標注X_{-1}。

然後使用該些測量點決定該尖端之幾何參數。在一特定圖示中的尖端左半徑係計算為X_{+1}與X_{apex}之間差的絕對值乘以1.414。在一特定圖示中的尖端右半徑係計算為X_{-1}與

X_{apex}之間差的絕對值乘以1.414。然後，基於該等左右半徑值，在一特定圖示中的尖端曲率半徑係計算為該等左半徑值與右半徑值之平平均。

針對八個尖端透視圖之各透視圖，重複曲率之右半徑、左半徑及尖端半徑之計算。然後平均尖端半徑係計算為在所有尖端圖示中曲率測量之尖端半徑之平均值。對於圖37A至37D所示之尖端，平均尖端半徑係決定為62 nm。

還計算所有尖端左右半徑之標準偏差並表述為平均尖端半徑之一百分數。對於圖37A至37D所示之尖端，離心率係決定為11.9%。

還決定在該等八個透視圖之各透視圖中的尖端錐角。如先前所述，在對應於各圖示之邊界曲線中，在沿Y方向所測量的離該尖端頂點1 μm的位置，在邊界曲線上的左右切點係分別位於該尖端頂點之左右側。然後在一特定圖示中的尖端左錐角係決定為在左切點處邊界曲線的一切線與平行於Y軸並延伸透過該左切點之一直線之間的一角度。然後在一特定圖示中的尖端右錐角係決定為在右切點處邊界曲線的一切線與平行於Y軸並延伸透過該右切點之一直線之間的一角度。最後，全錐角係決定為該等左右錐角之數量和。

然後藉由根據該等八個尖端透視圖，計算該尖端全錐角之八個測量之平均來決定該尖端之平均全圓錐角。例如，對於圖37A至37D所示之尖端，平均全錐角係決定為34.5°。

對於一特定尖端圖示，圓錐方向係計算為左右錐角數量之間差的絕對值的一半。針對該尖端之八個圖示之各圖示，重複此決定產生該尖端之八個圓錐方向測量。然後該尖端之平均圓錐方向係計算為該些八個圓錐方向測量之平均。對於圖37A至37B所示之尖端，平均圓錐方向係決定為2.1°。

基於平均尖端半徑、半徑離心率、平均錐角度及平均圓錐方向之測量的一組標準用於決定是否接受一給定尖端用於該氦離子顯微鏡。一般而言，該些標準係如下。在以下情況下接受使用該尖端：所測量的平均錐角在15°至45°之間，平均尖端半徑在35 nm與110 nm之間，曲率測量之標準尖端半徑偏差小於30%，而平均圓錐方向小於7°。最終，如圖37A至37D所示之尖端滿足該些標準之各標準，故接受此尖端用於該氦離子顯微鏡。

在確認尖端幾何特性之後，在一自訂建立的FIM中檢查該尖端。該FIM包括：一固定區域，其用於該支撐裝配件支撐該尖端、一高壓電源，其用於偏壓該尖端、相鄰該尖端的一擷取器、及一偵測器，其用於記錄來自該尖端之離子發射圖案。

擷取器與該尖端相隔5 mm遠並具有10 mm的一開口。該擷取器係接地至一外部接地。該偵測器，即一組合微通道平板(MCP)與影像增強器(購自麻塞諸塞州Sturbridge市Burle Electro-Optics公司)係定位於距離該擷取器75 mm處。

包括尖端的支撐裝配件係安裝於該FIM內並將該FIM室抽真空至1×10^{-8} Torr的一背景壓力。使用液氮作為冷卻劑將該尖端冷卻至77 K。在溫度平衡之後，將該來源加熱至900 K持續5分鐘以釋放冷凝物或在處理期間已在尖端上所形成的其他雜質。藉由施加一電流至該尖端所焊接的加熱器導線來完成加熱該尖端。使用具有恒定功率能力的一電源(Bertan型號IB-30A，購自紐約州Hauppauge市Spellman High Voltage公司)來施加該電流。使用一光學高溫計(購自紐約州Windsor市Pyro公司)來進行溫度測量。

隨後，允許該尖端再次冷卻至77 K，並接地該FIM擷取器並相對於該擷取器將該尖端偏壓至+5 kV。在1×10^{-5} Torr壓力下將高純度氦氣體(99.9999%純度)引入該FIM室內。漸進地將該尖端偏壓遞增至+29 kV，直至在該偵測器上觀察到對應於離開該尖端之氦離子的一氦離子影像。該FIM發射圖案對應於在該尖端表面上的大約300個原子。基於該FIM圖案，確認該尖端之單晶組成及W(111)定位。

接著，銳化該尖端以在該尖端頂點獲得一終端原子三聚物。將氦氣體從該FIM室抽出，直至在室內的背景壓力小於1.2×10^{-8} Torr。然後如上所述，經由施加電流至該加熱器導線，加熱該尖端至1500 K的一溫度持續2分鐘。在1×10^{-5} Torr壓力下在該尖端附近將氧氣引入該FIM室內。在2分鐘之後，降低該尖端溫度至1100 K。在1100 K兩分鐘之後，關閉氧氣供應並讓該尖端冷卻至大約77 K。在冷卻期間，在關閉氧氣供應後大約15分鐘，從該FIM室抽出

殘留氧氣，直至在該室內的背景壓力小於1.2×10^{-8} Torr。

一旦冷卻至液氮溫度，按上述偏壓該擷取器，並相對於該擷取器再次在+5 kV下偏壓該尖端。將在一1×10^{-5} Torr壓力下的氦氣體引入該FIM室內，並如上述再次操作該FIM以獲取該尖端之氦發射影像。漸進地增加該尖端電壓，直至在該尖端上大約+18 kV的一偏壓電位下，該偵測器捕捉到該尖端之一FIM影像。

除了在尖端頂點的所需三個原子三聚物結構之外，所觀察到的FIM圖案還包括附帶吸附原子的原子。該等吸附原子在+18 kV的尖端偏壓電位下藉由場蒸發來緩慢移除。在場蒸發期間，週期性地捕捉並監控尖端影像以決定停止場蒸發處理之時間。逐一地移除該等吸附原子，直至觀察到在該尖端頂點的一原子三聚物之一清晰FIM影像。除原子三聚物外，還清楚地觀察到一三角錐體之脊。

該原子三聚物係藉由進一步場蒸發該尖端來緩慢移除。藉由緩慢增加該尖端偏壓超過+18 kV，逐一移除該等三聚物原子，從而產生在該偵測器所記錄之FIM影像中觀察到的變圓尖端。

將該尖端偏壓電位進一步增加至+28 kV。在此製程期間繼續場蒸發該等尖端原子。在+28 kV的一偏壓電位下，在該尖端頂點獲得另一原子三聚物。該第二三聚物之一FIM影像如圖40所示。在獲得該第二三聚物之後，降低該尖端偏壓電位以在該FIM發射圖案中獲得最高角強度。此點在+23 kV之一尖端偏壓下發生。最高角強度係藉由調整該尖

端偏壓以在該FIM發射圖案中獲得一選定原子之最大觀察亮度來決定。當調整該尖端之電位偏壓時，發生最高角放射強度之偏壓係藉由測量來自該三聚物之氦離子電流來確認。使用定位於該氦離子束路徑內的一法拉第杯來測量該氦離子電流。

然後該尖端係藉由緩慢增加該尖端偏壓電位超過+28 kV並從該尖端頂點場蒸發原子來鈍化成一幾乎球形末端形狀。繼續場蒸發，直至在一+34 kV偏壓電位下在該尖端表面獲得另一原子三聚物。為了確認該尖端重建程序之可重複性，重複該銳化程序兩次以上，以在該尖端頂點獲得新原子三聚物。在兩次連續三聚物重建之後，關閉氦氣體供應，移除施加的尖端偏壓，讓該尖端溫暖至室溫，而該FIM室壓力緩慢地等化至大氣壓力。將仍固定於該支撐裝配件的該尖端存放於一架子上持續2周，直至其用於一氦離子顯微鏡。

將包括該尖端之該支撐裝配件安裝於類似於圖1及5所示之系統的一氦離子顯微鏡系統內。該系統之該等元件係配置如下。該擷取器係定位於距離該尖端1 mm處，並具有直徑為3 mm的一開口。該離子光學之第一透鏡係定位於距離該擷取器30 mm處。在穿過該第一透鏡之後，離子穿過配置成四極電極的該等對齊偏轉器。具有直徑為20 μm之一開口的一孔徑係進一步沿該離子路徑定位以選擇性地阻礙該離子束之一部分。該等離子軌道之一交叉點位於距離該孔徑前面50 mm處。該像散校正器，其配置成一八極電

極，係位於該孔徑之後以調整該離子束之像散。掃描偏轉器，其係配置成八極電極，係定位於該像散校正器之後以允許橫跨一樣本表面光柵掃描該離子束。該第二透鏡係定位於距離該孔徑150 mm處，並用於將該離子束聚焦於一樣本表面上。該第二透鏡係成形成一切去頂端直角圓錐，其全錐角為90°。

最初，將該離子顯微鏡系統抽真空，使得在該尖端區域內的基座壓力大約為2×10^{-9} Torr。使用液氮將該尖端冷卻至大約80 K。接地該擷取器，然後相對於該擷取器將+5 kV偏壓施加至該尖端。

該尖端係藉由施加8 W的電功率至該加熱器導線來加熱，直至其可看見地發光(對應於大約1100 K的一尖端溫度)。使用相對於垂直於該離子光學之縱軸的一平面傾斜45°的一鏡面，從該離子光學之一側埠觀察到從該發光尖端發射的光子。為此目的，經由離子行內的一側埠，位置正好在該等對齊偏轉器下面，將該鏡面引入該離子光學內。反複地傾斜並偏移該尖端，直至該發光尖端大致地沿該離子光學之縱軸瞄準。當該發光尖端顯現為一圓點來源時，完成該尖端與該縱軸之正確對齊。在該尖端顯現為杆狀之情況下，該尖端係錯誤對齊。

讓該尖端冷卻，同時相對於該擷取器，在一+5 kV電位偏壓下維持該尖端。一旦該尖端已冷卻至液氮溫度，在一1×10^{-5} Torr壓力下將氦氣體引入該尖端區域內。如上所述，該離子顯微鏡係在SFIM模式下運行，以產生一影

像，其顯示該尖端之氦離子發射圖案。該影像以原子精度指示該尖端之形狀。該等對齊電極係用於在該孔徑表面之上光柵掃描從該尖端所產生的離子束。將鋸齒電壓功能施加至該等對齊偏轉器之各對齊偏轉器，以相對於該顯微鏡系統之共用外部接地，在該等鋸齒功能之一最大電壓150 V下，實現以10 Hz的一圖框速率進行光柵掃描。該光柵掃描圖案在橫過該離子光學軸之二正交方向之各方向上掃描256個點。在此成像模式下不使用該像散校正器及該等掃描偏轉器。

為了偵測透過該孔徑之離子，將一銅樣本放置於該第二透鏡下，並正偏壓一MCP偵測器(相對於共用外部接地+300 V)，以測量由於該樣本與入射在該樣本上的該等氦離子之間相互作用而離開該銅樣本之二次電子。該偵測器係定位於距離該樣本10 mm處並平行於該樣本平面而定向。

該獲取系統在各光柵掃描點取樣該偵測器信號並產生該尖端之一SFIM影像，其係顯示於一監視器上。為了促進成像，在該離子行內的該第一透鏡之電位係設定為該尖端偏壓之77%。然後，隨著該尖端偏壓增加，在大致恒定放大倍率及強度下維持該SFIM影像。在觀察該SFIM影像時，緩慢增加該尖端偏壓以消除不合需要的吸附原子並產生在其頂點具有一原子三聚物之一尖端。藉由進一步增加該尖端偏壓電位以引起場蒸發該等尖端原子來移除此三聚物。場蒸發繼續直至在一施加尖端電位+23 kV下在該尖端

頂點形成一新原子三聚物。此尖端之產生SFIM影像如圖41所示。

關閉該等對齊偏轉器、像散校正器、掃描偏轉器及第二透鏡(例如在相對於該顯微鏡系統之共用外部接地之零電位下)，當該第一透鏡之強度係調變100 V時，選擇該三聚物之一原子且傾斜並轉移該尖端。該顯微鏡系統係在FIM模式下操作且該偵測器收集該尖端之FIM發射影像。當調變該第一透鏡之強度時，重複地傾斜並轉移該尖端，直至該尖端在該等FIM影像上的中心位置從一影像到另一影像不變。

接著，將該孔徑放置於適當位置內，並調整施加至該等對齊偏轉器之電位以在該孔徑處控制離子束之位置。透過該孔徑之離子束之部分係藉由該偵測器來成像，且該等偵測器影像用於重複地調整該等對齊偏轉器。

該等掃描偏轉器係用於在該樣本表面之上光柵掃描透過該孔徑之離子束。將在該樣本表面上的一可識別、高對比度特徵(一銅格柵)(零件號02299C-AB，購自賓夕法尼亞州West Chester市Structure Probe International公司)放置於該第二透鏡下的離子束路徑內，並使用上述組態藉由該偵測器來測量該特徵之二次電子影像。

該第二透鏡之強度係調整成用以將該離子束大致聚焦在該樣本表面上；相對於該共用外部接地，施加至該第二透鏡之電位偏壓大約為15 kV。從該偵測器所記錄之該等樣本影像視覺上估計焦點品質。該離子束相對於該第二透鏡

軸之對齊係藉由以一1 Hz頻率及該第二透鏡之操作電壓之大約0.1%的一調變振幅來緩慢地調變該第二透鏡之強度並觀察該特徵之位移來評估。在該最後透鏡中的光束對齊係藉由調整該等對齊偏轉器之電壓來最佳化。當該偵測器所測量之影像之中心位置在調變該第二透鏡之強度期間不明顯變化時，最佳化該對齊。

然後，藉由調整該第二透鏡之強度，以一更高放大倍率來成像該樣本，使得在該樣本上的視場大約為2平方μm。藉由調整該等像散校正器控制來最小化聚焦不對稱。調整該些控制，同時觀察該影像且尤其觀察各個方向上的邊緣銳利度。當該聚焦影像之銳利度在各個方向均相同時，該像散校正完成。一般而言，將不超過30的伏特施加至該像散校正器以實現此條件。在此時，該氦離子顯微鏡係完全運作。

該運作顯微鏡用於成像各種樣本。藉由測量二次電子所成像之樣本如圖42及43所示。

該等成像條件包括各種離子束電流(100 pA至1 fA)。離子束電流係藉由數種方法來控制。首先，使用一自動化孔徑機制將具有不同直徑孔的不同孔徑放置於適當位置內。該孔徑機制包括直徑在5 μm至100 μm之間變化的孔徑。其次，該第一透鏡焦點強度係調整以在該離子光學中更靠近孔徑平面地移動離子束交叉點，使得一更大離子電流到達樣本。反之，該第一透鏡焦點強度係調整成用以更遠離該孔徑地移動該光束，使得更少的離子電流穿過該孔徑。第

三，分別增加或減小在尖端區域內的氦氣壓力以增加或減小離子束電流。

一般針對最佳角強度來選擇離子束能量，該離子束能量一般在17 keV至30 keV之範圍內。該離子束能量回應該尖端形狀變化而隨時間變化。

依據使用該離子顯微鏡所檢查之樣本類型來選擇所使用的偵測器類型及偵測器設定。為了測量一樣本之二次電子影像，一ET偵測器與一金屬格柵一起使用，該金屬格柵相對於該共用外部接地在大約+300 V下偏壓。在該ET偵測器內部的一閃爍物係相對於外部接地在+10 kV下偏壓，並調整內部PMT之增益以不飽和地產生最大可能的信號。

還使用一MCP偵測器(購自麻塞諸塞州Sturbridge市Burle Electro-Optics公司)來偵測來自樣本之二次電子及/或散射氦。可相對於外部接地各偏壓該MCP格柵、正面及背面。該偵測器之增益係藉由相對於前端正偏壓該MCP之背面來達到。一般增益電壓為1.5 kV。相對於該背面，在+50 V下偏壓相鄰該背面的一收集器板。從該收集器板，偵測信號採用疊加於較大正電壓上的一較小變化電流形式。為了收集二次電子，將該MCP之正面及格柵偏壓至+300 V。為了收集散射氦，將該正面及格柵偏壓至-300 V。

必要時調整該光柵掃描速度為各樣本獲得最佳成像條件。每像素之停留時間在100 ns至500 μs範圍之間變化。為了獲得更短的停留時間，藉由平均化多個掃描來減小雜訊。針對連續線掃描並針對連續圖框掃描來完成此點。

圖42所示之影像係在一矽基板上的複數個納米碳管之一影像。該影像係藉由從該等奈米管表面偵測二次電子來成像。一ET偵測器係定位於距離樣本8 mm處並離該離子束軸外15 mm，且相對於該樣本平面以一20°角定向。氦離子束電流為0.5 pA而平均離子束能量為21 keV。使用每像素200 μs的一停留時間來光柵掃描該離子束，且總影像獲取時間為200秒。該影像之視場為4 μm。

圖43所示之影像係在一矽基板上的一鋁柱之一影像。該影像係藉由從該等奈米管表面偵測二次電子來成像。上述類型的一MCP偵測器係定位於距離該樣本10 mm處並平行該樣本表面而定向，相對於外部接地在+300 V下偏壓格柵及正面。氦離子束電流為0.5 pA而平均離子束能量為24 keV。使用每像素200 μs的一停留時間光柵掃描該離子束。在該樣本表面處的視場為1 μm，其係藉由施加一最大電壓1 V至該等掃描偏轉器來獲得。

此尖端在氦離子顯微鏡中之操作持續數周而不需要排出該系統以保養該離子源。如圖44所示之SFIM影像所指示，隨著移除三聚物原子，不論有意或透過正常使用，該尖端之末端形式變得更加球形。需要時藉由使用與在FIM中所最初執行的相同熱及氧構建配方來執行現場角錐重建(銳化)以銳化該尖端。一般而言，各重建製程耗費不足5分鐘的時間，並在此數週期間可另外使用該系統。總體上，該尖端係重建八次以上。在該尖端頂點處的一重建原子三聚物之一影像所圖45所示。

2.

一W(111)尖端係固定於一支撐裝配件內並按照範例1所述之程序加以電化學蝕刻。該尖端之一SEM影像如圖46所示。依據範例1之程序來執行該尖端之幾何特徵化。對於此尖端，平均尖端半徑係決定為70 nm。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

在確認該尖端幾何特性在可接受限制範圍內之後，將包括該蝕刻尖端之來源裝配件裝入範例1所述之FIM內。該FIM之組態與範例1所述之組態相同，下述除外。相對於該擷取器，將在該尖端上的電位偏壓緩慢地增加直至一電位+21.8 kV。隨著電位增加，發生尖端原子之場蒸發。在到達+21.8 kV之後，將該尖端電位減小至+19.67 kV。將該尖端維持在此電位，獲取如圖47所示之該尖端FIM影像。使用此影像，確認該尖端之單晶結構及正確定位。

接著，銳化該尖端以在該頂點產生一原子三聚物。從該FIM室抽出氦，並藉由施加一恒定電流4.3 A至該尖端持續20秒來加熱該尖端。一傾斜鏡面係用於觀察該尖端，該傾斜鏡面係安裝於該FIM行內並成角度以將沿該行軸傳播的光重新導引至該行之一側埠。肉眼無法看見任何發光(例如從該尖端所發射之光子)，故讓該尖端冷卻5分鐘。然後藉由施加一恒定電流4.4 A至該尖端持續20秒來加熱該尖端。肉眼無法看見任何發光，故讓該尖端冷卻5分鐘。然後藉由施加一恒定電流4.5 A至該尖端持續20秒來加熱該尖端。肉眼無法看見任何發光，故讓該尖端冷卻5分鐘。然

後藉由施加一恒定電流4.6 A至該尖端持續20秒來加熱該尖端。在此溫度下，可從該尖端清楚看見一發光。因而，引起尖端發光所必需之電流係建立為4.6 A。然後讓該來源冷卻5分鐘。

接著，將一負偏壓施加至該尖端，同時監控來自該尖端之電子發射電流。使該偏壓不斷地負向增加，直至觀察到來自該尖端的一電子發射電流50 pA。在此電流下的尖端偏壓為-1.98 kV。仍將此偏壓施加至該尖端，將加熱電流4.6 A施加至該尖端。在大約20秒之後再次觀察到尖端發光。在觀察到尖端發光之後，再延長加熱該尖端10秒。然後從該尖端移除施加於該尖端的該偏壓電位及加熱電流，並讓該尖端冷卻至液氮溫度。

一旦該尖端已冷卻，將相對於該擷取器的一正偏壓+5 kV施加至該尖端。在1×10^{-5} Torr壓力下，在該尖端附近接納氦氣體至該FIM室。如範例1所述，獲取該尖端頂點之FIM影像。隨著該偏壓增加，更清晰地看見該FIM影像。在圖48中的影像係在一尖端偏壓+13.92 kV下觀察到的。該影像顯示一角錐之脊及對應於一原子三聚物的一明亮中心頂點。

在該尖端上的該等發射原子之某些發射原子係鬆散束縛的吸附原子並經由場蒸發尖端原子，使用漸增的場強度來移除。進一步增加該尖端偏壓，並藉由增加至+21.6 kV的場蒸發來移除第一及第二三聚物。在到達此電位之後，降低該尖端偏壓至+18.86 kV並記錄圖49中的尖端FIM影像。

基於範例1所識別的標準，將該尖端識別為可行並從該FIM移除。在大約一個月之後，將該尖端固定於如範例1所述配置的一氦離子顯微鏡內。在如範例1所述之一製程中多次重建並蒸發三聚物，除了未使用任何氧氣體。相反，該三聚物重建製程依賴於施加一特定負電位偏壓至該尖端(以產生一電子發射電流50 pA)，同時使用施加至該加熱器導線的－4.6 A電流來加熱該尖端，從而造成該加熱器導線可見發光20秒。該尖端保持在該氦離子顯微鏡內並提供超過四周的使用而不需要排出該系統以保養該尖端。在此期間，使用涉及一負施加電位偏壓及加熱之程序，多次重建該尖端，如上所述。該尖端之一重建三聚物之一SFIM影像如圖50所示。

使用具有此尖端之一氦離子顯微鏡所記錄之一半導體樣本之一影像如圖51所示。該樣本包括沈積於一矽氧化物基板之表面上的鋁金屬線。一未知塗層係沈積於該些材料之各材料頂上。

將最大振幅為1 V的掃描電壓引入至該等掃描偏轉器上以在該樣本上產生一10 μm的視場。該等第一及第二透鏡、該等對齊偏轉器及該像散校正器之該等電位係調整成用以控制穿過該孔徑之氦離子束之部分並控制在樣本位置處的離子束焦點之品質，如範例1所述。在成像期間傾斜並旋轉該樣本以揭示三維本質及側壁細節。

圖51所示之影像係藉由測量來自該樣本表面之二次電子來記錄。一MCP偵測器係定位於距離該樣本10 mm處，並

平行該樣本平面而定向。該MCP格柵及正面係相對於共用外部接地在+300 V下偏壓。氦離子束電流為4 pA而平均離子能量為21.5 keV。總的影像獲取時間為30秒。

使用此尖端所攝取之另一半導體樣本之一影像如圖52所示。該樣本係一多層半導體器件，表面特徵由一金屬形成。該影像係藉由測量由於該樣本與該等入射氦離子相互作用而離開該樣本表面之二次電子來記錄。將最大掃描電壓150伏特施加至該等掃描偏轉器以在該樣本表面產生一1.35 mm的視場。

該樣本係從一從上自下的角度觀察到，其顯示該樣本表面上的許多特徵。為了記錄影像，格柵及正面相對於共用外部接地在+300 V下偏移的一MCP偵測器係定位於距離該樣本10 mm處，並平行該樣本表面而定向。氦離子束電流為15 pA而平均離子能量為21.5 keV。使用每像素10 μs的一停留時間來光柵掃描該離子束。

3.

在此範例中的尖端係使用範例2所述之一程序在該氦離子顯微鏡中製備並對齊。依據範例1之程序來執行該尖端之幾何特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

藉由直接或外推之測量，在一已知之束電流及長達一已知獲得時間，獲得一樣本之影像係可能的。使用一法拉第杯以及一微量電流計，該束電流經仔細監測(模式487，Keithley Instruments, Cleveland, OH)。在該尖端區域內之氦之壓力，使用一B-A電離真空計也經仔細監測(可取得自

Varian Vacuum Inc, Lexington, MA)。在一階段中，其中該氦離子流太低以致不能準確測量(例如，小於約0.5 pA)，該離子流係基於該測得之氦氣壓力由外推法決定。該氦氣壓力及氦離子電流常見的係線性成比於彼此，並且該線性關係自一尖端至另一尖端係一致的。

該樣本係具有拓撲特徵之一金格柵樣本(零件號02899G-AB，購自賓夕法尼亞州West Chester市Structure Probe International公司)。該樣本係藉由測量回應入射氦離子而離開該樣本表面之二次電子發射來成像。為了記錄影像，一40 mm直徑環形、山型MCP偵測器(購自麻塞諸塞州Sturbridge市Burle Electro-Optics公司)係定位於距離該樣本10 mm處，並平行該樣本表面而定向。該偵測器耗費大約1.8球面度的一立體角並相對於該離子束對稱。該偵測器係直接固定至該第二透鏡底部，如圖66所示。該MCP之前表面係相對於共用外部接地而正偏壓(+300 V)，且還存在一正偏壓(相對於共用外部接地)內部金屬格柵(+300 V)。

平均離子能量為20 keV。該樣本之影像係分別使用離子束電流1 pA、0.1 pA及0.01 pA來測量，且分別如圖53、54及55所示。總的影像獲取時間分別為33秒、33秒及67秒。

對於首兩個影像(圖53及54)，影像大小為1024×1024像素。對於第三個影像(圖55)，影像大小為512×512像素。在各影像中，將大約2 V的最大掃描電壓施加至該等掃描偏轉器以在該樣本表面產生一20 μm的視場。

為了確保散射氦離子及/或中性原子不明顯作用於該些

柱來源裝配件內之相對較低振動降低該等離子顯微鏡影像由於尖端振動會具有可感知影像假影(例如離子束著陸錯誤)之可能性。

5.

依據範例1所述之程序製備一尖端，除了使用一不同加熱器導線外。用於此範例之加熱器導線直徑比範例1中的加熱器導線之直徑大大約25%。更粗的加熱器導線對於振動運動係更低相容，因為一般而言導線硬度隨著直徑增加而增加。此外，該更粗的加熱器導線係由一鎢銖合金(74%鎢，26%銖)形成。該合金導線電阻率明顯比範例1之鎢加熱器導線更高；整體加熱器導線電阻係測量為大約0.5歐姆。適當的鎢銖合金導線係購自Omega Engineering公司(康乃狄克州Stamford市)。

該更粗的加熱器導線增加該支撐裝配件(包括尖端)之自然頻率，從大約1.5 kHz(範例1)增加至大約2.2 kHz(此範例)。當實施於該氦離子顯微鏡時，在該來源裝配件內的該尖端與此加熱器導線裝配件之相對較低振動降低該等離子顯微鏡影像由於尖端振動會具有可感知影像假影(例如離子束著陸錯誤)之可能性。

6.

一尖端係藉由範例1所述之一製程來形成，除了由熱解碳塊(購自賓夕法尼亞州Easton 市MINTEQ International Pyrogenics Group公司)替換該加熱器導線。該來源裝配件之該等支柱係相對彼此彎曲並匹配以具有平行平直表面。

為了固定該發射器導線，該等支柱係撬開並將兩個熱解碳塊插入該等支柱之間。該發射器導線係置放於該等碳塊之間，然後釋放該等支柱。該等支柱施加於該等碳塊之壓縮力將該等碳塊及發射器導線保持在該支撐裝配件上的適當位置內，從而防止該發射器導線相對於該支撐基座作相對運動。該支撐裝配件之一部分(包括該等彎曲支柱、該等二碳塊及該發射器導線)係如圖57所示。

該等熱解碳塊大小係選擇使得該等碳塊及該發射器導線係處於壓縮中。在沒有放置該等碳塊之情況下，該等彎曲支柱之間的間隔為1.5 mm。該等碳塊在該等二彎曲支柱之間沿一方向各具有一700 μm長度。該發射器導線直徑為250 μm。

該等熱解碳塊係相對於該等彎曲支柱定向以獲得最大電阻及最小導熱率(例如在該等熱解碳塊內的碳平面大約垂直於接合該等支柱的一直線而定向)。該支撐裝配件之電阻係在1500 K下測量為4.94歐姆，其大於範例1之支撐裝配件之電阻(0.56歐姆)。加熱該尖端至1500 K所需之功率為6.4 W(比較在範例1中加熱尖端至1500 K所需的大約11 W)。該尖端係相對於該來源基座而相對剛性地固持，由於缺少一加熱器導線。該支撐裝配件之自然振動頻率大於3 kHz。

當實施於該氦離子顯微鏡內時，在此來源裝配件內的該尖端(藉由在該尖端任一側施加至熱解碳塊之壓縮力固持於位置內)之相對較低振動降低該等離子顯微鏡影像由於尖端振動會具有可感知影像假影(例如離子束著陸錯誤)之可能性。

7.

一尖端係按照範例1所述之一程序而製備，且按範例1所述執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM內銳化該尖端。然後安裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。如範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該顯微鏡系統係配置成用以測量由於該樣本與該等入射氦離子相互作用而離開樣本之二次電子。一MCP偵測器(類似地配置成範例3所述之偵測器)用於記錄樣本影像。

該樣本係鋼，且形狀為球形，成分均勻。氦離子束電流為1.0 pA而平均離子能量為20 keV。使用每像素10 μs的一停留時間來光柵掃描該離子束。施加至該等掃描偏轉器之最大電位(大約100 V)在該樣本表面產生大約1 mm的一視場。

圖58顯示此方法之一範例。該影像反映針對該樣本的總二次電子產率。該影像揭示在右手邊緣處二次電子產率提高。該提高產率由於在樣本表面附近二次電子可逃逸的離子束路徑長度增加所導致。該二次電子產率係發現大約與sec(α)成比例增加，其中α表示入射氦離子束與該樣本表面之一法線之間的角度。

一第二樣本之影像係如圖59A及59B所示。用於圖59A所示之樣本之成像條件如上面結合此範例中的第一樣本所述。

在20 keV之能量下，在明顯發散之前，該氦離子束較深穿入該樣本內(大約100 nm)。因此，該等樣本影像邊緣顯

示一相對更窄的橋邊緣效應(例如減小的邊緣浮散)。例如，在圖59A中的影像係從該氦離子顯微鏡來記錄，而圖59B中的影像係使用一標準SEM來記錄。在二者影像中，信號僅由測量二次電子所引起。在如圖59B所示之SEM影像中，該SEM係在離子束能量2 keV及離子束電流30pA之成像條件下操作。

觀察到該等橋邊緣在該氦離子顯微鏡影像中略微更窄，比較入射電子，咸信其係由於氦離子在該樣本表面更小的相互作用體積所造成。該氦離子束在其穿入該樣本時保持相對準直。相比之下，該SEM電子束產生緊鄰該樣本表面的相當程度更寬的一相互作用體積。因此，該入射電子束所產生的二次電子由於在該表面上從額定電子束位置延伸數奈米之一表面區域所引起。因此，該SEM的橋邊緣效應實質上更寬，如比較圖59A及59B中的影像視覺上可見。

為了數字上比較在該二影像中的橋邊緣效應，可在該等影像之各影像中橫跨一共用邊緣特徵執行一線掃描。結果係如圖67A及67B所示，其分別對應於圖59A及59B。該線掃描面積為1像素寬，50像素長。在該線掃描內的強度峰值(其對應於邊緣特徵)在半最大值(FWHM)下具有一全寬度，該半最大值在該SEM影像中比在對應氦的離子顯微鏡影像中寬40%。如上所述，相對於電子，在該氦離子顯微鏡影像中所觀察到的減小邊緣寬度係由於氦離子在該樣本表面處更小的相互作用體積所造成。

8.

一尖端係按照範例1所述之一程序來製備，並按範例1所述來執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM中銳化該尖端。然後安裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。如範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該顯微鏡系統係配置成用以測量由於該樣本與該等入射氦離子相互作用而離開樣本之二次電子。一MCP偵測器(如範例3所述)用於記錄樣本影像。

各種範例係測量以定量決定用於許多材料的二次電子產率。各樣本由要測試的一件平直材料所組成。在該樣本上面在2 mm距離處定位的係具有一低填充因數(例如大多數開放的空間)的一金屬絲網。一微量電流計(俄亥俄州Cleveland市Keithley Instrument公司)係用於結合一法拉第杯測量樣本電流，該法拉第杯係藉由將一渠溝適配於各樣本之表面內來整合於各樣本內。

各實驗藉由定位離子束，使其入射在各樣本內的法拉第杯上來開始測量氦離子電流。接著，在該樣本上光柵掃描該氦離子束，同時相對於共用外部接地，施加一可邊偏壓至該絲網，並測量來自該樣本之二次電子電流。

該氦離子束係有意散焦(至一光點大小100 nm)以最小化任何污染物或充電假影。該絲網偏壓電位係從-30 V遞增調整至+30 V，並為各偏壓電位測量二次電子電流。使用一氦離子束能量22.5 keV及一離子束電流13 pA進行各測

量。在圖60中的曲線圖顯示針對一矽樣本之結果。

在該曲線圖左側，在負偏壓該絲網之情況下，由於該樣本與入射氦離子相互作用而離開該樣本的所有二次電子均返回至該矽樣本。該氦離子束電流與該二次電子電流大約相等，因此產生忽略不計數量的自由二次離子及散射氦離子。在該曲線圖右側，在正偏壓該絲網之情況下，由於該樣本與入射氦離子相互作用而離開該樣本的所有二次電子均加速離開該樣本。所測量的樣本電流係該氦離子電流與該二次電子電流之總和。基於該些測量，針對(以一正常入射方式)入射在一平直矽樣本之一22.5 keV氦束的二次電子產率為大約(44-13)/13=2.4。

在類似測量條件下，針對各種材料，遵照一類似測量程序。結果係概述於下表內。

材料	二次電子產率
鋁	4.31
矽	2.38
鈦	3.65
鐵	3.55
鎳	4.14
銅	3.23
鋦	4.69
鎢	2.69
銖	2.61

鉑	7.85
金	4.17
鉛	4.57

針對不同材料的該些相對較大二次電子產率及較寬的值範圍說明一般觀察結果，即基於二次電子偵測之氦離子顯微鏡影像提供一種區分不同材料的較佳方法。作為一範例，圖61A係使用該氦離子顯微鏡記錄的在一基板表面上的一對齊交叉之一二次電子影像。將最大振幅大約為1.5 V的掃描電壓引入至該等掃描偏轉器上以在該樣本上產生一15 μm的視場。一MCP偵測器係定位於距離該樣本10 mm處，並平行該樣本之平面而定向。該MCP之格柵及正面係相對於共用外部接地在+300 V下偏壓。氦離子束電流為5 pA而平均離子能量為27 keV。使用每像素150 μs的一停留時間來光柵掃描該離子束。

圖61B係對相同特徵所攝取之一SEM二次電子影像。該SEM係在實驗上決定的最佳成像條件下操作，該條件為電子束能量2 keV及電子束電流30 pA。嘗試過其他束電流、掃描速度及束能量，但無任何者提供一更佳的對比度。

該氦離子顯微鏡影像顯示在形成該對齊交叉之不同材料之間的更大對比度，因為相對於一入射電子束，針對一入射氦離子束之二次電子產率差異更大。在圖61A之影像中視覺上可容易地區分對齊交叉中的該等二材料。然而，如在圖61B中定性觀察，該等二材料針對該SEM之入射電子束具有類似的二次電子產率。

9.

一尖端係遵照範例1所述之一程序而製備，並如範例1所述執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM中銳化該尖端。然後安裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。如範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該顯微鏡系統係配置成用以測量由於該樣本與該等入射氦離子相互作用而離開樣本之二次電子。一MCP偵測器(如範例3所述)用於記錄樣本影像。該MCP之前端係相對於共用外部接地偏壓至+100 V，如在其前面的格柵。在此組態中，該MCP能夠幾乎收集所有由於樣本與入射氦離子相互作用而離開該樣本的二次電子，除了在正偏壓的一樣本區域內產生的二次電子外。該些電子由於正電壓偏壓而返回至該樣本，而不是從該樣本完全釋放並被該MCP偵測到。

該樣本之多個區域係正偏壓，同時由於來自入射氦離子束之正電荷到達，而負電荷離開(二次電子)。一給定氦離子束電流在該樣本上所引起的電壓偏壓數量取決於該樣本之曝露區域相對於該樣本之周圍部分的電容及/或電阻。依據該樣本之電容及/或電阻特性，對於該樣本之不同區域該些差異引起不同的二次電子收集。偵測到的二次收集差異在使用該氦離子顯微鏡所記錄之樣本影像中產生對比度。依此方式，基於二次電子影像決定該樣本之電性特性。

在圖62中，顯示一樣本之一二次電子影像。該樣本之特

徵為沈積於一絕緣基板表面上的一組鋁線。將最大振幅為3 V的掃描電壓引入至該等掃描偏轉器上以在該樣本上產生一30 μm的視場。氦離子束電流為5 pA而平均離子能量為26 keV。使用每像素100 μs的一停留時間來光柵掃描該離子束。

該樣本影像顯示一系列明亮、週期性鋁線。在該些亮線之間的空間內係一系列更暗的線。在該影像中該中間亮線顯示一清楚邊界，在其之外為暗線。基於該樣本之本質，該等亮線對地具有一低電阻，或可能對地具有一極高的電容，因此其不會由於該氦離子束作用而實質上偏壓。

該等暗線係在該氦離子束影響下而正偏壓，並因此該處產生的二次電子均返回到該樣本。為了決定此效應是否由於該等暗線之電容或電阻特性所引起，在該氦離子束下觀察該等暗線一段時間。若該效應在本質上係電容性，則該等線隨時間而不斷地變暗。

中間鋁線從明亮轉變成黑暗可指示在(例如)線上存在一電性斷開。該線之下部明亮部分可能不完全電性接觸該線之上部黑暗部分。

圖63顯示使用上述測量組態所記錄之另一樣本之一影像。該樣本包括在一矽基板上由銅所形成的線及其他特徵。最小特徵採用字母(「DRAIN」)形式。如觀察結果(各字符頂部顯現明亮而各字符底部顯現黑暗)所表明，在該些特徵上的正電位偏壓隨著影像獲取過程而增加。在此影像中的光柵掃描自頂部向底部進行。因此，在該樣本之表

面特徵上的偏壓機制主要係電容性。

10.

一尖端係遵照範例1所述之一程序來製備，並如範例1所述執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM中銳化該尖端。然後安裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。按範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該顯微鏡系統係配置成用以測量由於該樣本與入射氦離子相互作用而離開樣本之二次電子。一MCP偵測器(如範例3所述)用於記錄樣本影像。該MCP之前端係相對於共用外部接地偏壓至+300 V，如在其前面的格柵。在此組態中，測量到的信號幾乎完全由二次電子所引起。藉由偏壓該MCP前端至-300 V，不改變該MCP增益，並觀察到該測量信號幾乎減小至零，來確認此點。

將最大振幅為3 V的掃描電壓引入至該等掃描偏轉器上以在該樣本上產生一30 μm的視場。氦離子束電流為10 pA而平均離子能量為22 keV。使用每像素100 μs的一停留時間來光柵掃描該離子束。

成像包括三個不同層的一樣本。最頂部金屬層由圖案化線所組成，該等線由銅所形成。下一層由一介電材料組成。底部層由另一不同圖案化金屬層所組成，該層由銅所形成。該範例之影像如圖64所示。該影像清晰地顯示該最頂部金屬層圖案為亮白色，疊加於對應於該底部(次表面)

金屬層的灰色影像特徵上面。該次表面金屬層在影像中不僅顯得更暗，而且略微模糊。

該測量信號係由於散射氦離子與中性氦原子二者在該樣本表面所產生之二次電子所引起。藉由負偏壓該MCP及絲網並注意到幾乎沒有偵測到任何信號，來確認此評估。由於樣本與入射的氦離子之相互作用而離開樣本的二次電子產生了圖64中的表面金屬層之影像。該次表面金屬層影像係由已穿入該樣本內並變中性化的氦離子所產生。該等中性氦原子從該次表面層散射，且其一小部分返回至該表面，在該表面處其在其出射時產生二次電子。此點解釋該等次表面特徵之模糊暗淡影像。

11.

一尖端係遵照範例1所述之一程序來製備，且如範例1所述執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM中銳化該尖端。然後安裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。按範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該顯微鏡系統係配置成用以測量由於該樣本與該等入射氦離子相互作用而離開樣本之二次電子。一MCP偵測器(如範例3所述)用於記錄樣本影像。該MCP之前端係相對於共用外部接地而偏壓至+300 V，如在其前面的格柵。在此組態中，測量到的信號幾乎完全由二次電子所引起。藉由偏壓該MCP前端至-300 V，不改變該MCP增益，並觀察到

該測量信號幾乎減小至零，來確認此點。

將最大振幅為15 V的掃描電壓引入至該等掃描偏轉器上以在該樣本上產生一150 μm的視場。氦離子束電流為10 pA而平均離子能量為21.5 keV。使用每像素100 μs的一停留時間來光柵掃描該離子束。

成像的樣本由一件鎢焊接所組成。該鎢已加熱超過其熔點並已隨後冷卻，形成不同的結晶域，在晶體顆粒之間有陡峭的邊界。該樣本係藉由測量由於該樣本與入射氦離子相互作用而離開該樣本之二次電子而成像。

圖65顯示該樣本之一影像。該影像顯示明顯更亮及更暗的顆粒。疊加於此背景上的係跨越數個顆粒的明亮影像特徵。該等明亮特徵對應於表面拓撲地貌圖案，其由於本文所揭示之拓撲效應而提高二次電子產生。該等各種晶體顆粒之對比影像強度係由於該等晶域相對於該入射氦離子束之相對定位所引起。當在一特定顆粒中的鎢晶格係定向使得該氦離子束大約平行於一低指數結晶方向進入時，在表面的散射機率較低，故該離子束較深地穿入該顆粒內。因此，在該材料表面處的二次電子產率相對較低，該顆粒在影像中顯得更暗。相反，當在一特定晶粒中的鎢晶格係定向使得該氦離子束係入射在一高指數結晶方向上時，在該顆粒表面之散射機率較高。因此，在該材料表面處的二次電子產率相對更高，該顆粒在影像中顯得更亮。

12.

一尖端係遵照範例1所述之一程序來製備，且如範例1所

述執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM中銳化該尖端。然後安裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。按範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該顯微鏡系統係配置成用以測量回應入射氦離子從一樣本所散射之氦離子及中性氦原子。一MCP偵測器(如範例3所述)用於記錄樣本影像。該MCP之前端係相對於共用外部接地偏壓至-100 V，如在其前面的格柵。在此組態下，二次電子由於該負施加的電位偏壓而不到達該MCP。該MCP所測量之信號由於入射在該MCP正面的散射氦離子及中性氦原子所引起。

將最大振幅為15 V的掃描電壓引入至該等掃描偏轉器上以在該樣本上產生一150 μm的視場。氦離子束電流為10 pA而平均離子能量為21.5 keV。使用每像素100 μs的一停留時間來光柵掃描該離子束。

成像樣本係在範例11中也檢查過的鎢焊接樣本。如前面，該鎢焊接包括不同結晶域，在該等顆粒之間有陡峭的邊界。

該樣本係藉由偵測入射在該MCP上的氦原子及氦離子之豐度來成像該樣本。使用此測量程序所獲得之一樣本影像如圖68所示。該影像同時顯示明亮及黑暗顆粒。對於一特定結晶顆粒，若在該顆粒內的鎢晶格係定向使得氦離子束沿一相對較低指數結晶方向入射，則在該顆粒表面處存在

較低的氦散射機率。因此，離子在散射發生之前相對較深地穿入該顆粒內。因此，該等氦離子(或當氦離子在該樣本中組合一電子時所產生之氦中性原子)較不可能離開該樣本並被該MCP偵測器偵測到。具有該些特性之顆粒在記錄影像中顯得較暗。

相反，若在一特定晶粒中的鎢晶格係定向使得該氦離子束係沿一相對較高指數結晶方向入射，則在該顆粒表面處存在相對較高機率的氦散射。因此，在散射之前該等氦離子在該樣本內的穿透度平均相對較淺。因此，氦離子及/或中性氦原子相對更可能離開該樣本表面並被該MCP偵測器偵測到。相對於入射氦離子束而具有高指數晶體定位之顆粒因此在圖68所示之影像中顯得更明亮。

參考圖65所示之影像，在圖68之影像中的拓撲資訊明顯減小，因為該影像係基於散射氦粒子所記錄，而非基於二次電子。特定言之，顯現在在圖65中之影像內的該等系列亮線係較大程度地從圖68中的影像移除。缺少拓撲資訊可使圖68中的影像相對更加容易轉譯，尤其在將圖68中的測量強度用於定量識別樣本中晶域之結晶特性(例如相對定位)之情況下。

13.

一尖端係遵照範例1所述之一程序而製備，且如範例1所述執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM中銳化該尖端。然後安

裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。按範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該顯微鏡系統係配置成用以測量回應入射氦離子從一樣本所散射之氦離子及中性氦原子。一偵測器(一微型MCP)係固定於一電馬達之軸上。使用銅帶覆蓋該MCP之正面以限制該MCP測量氦離子及/或中性原子。在該銅帶中的一小圓孔允許散射氦離子及/或中性原子僅在該等粒子在一狹窄角度範圍內落下之情況下到達該MCP。在此範例中，將氦離子及/或中性原子之測量限制於一角度範圍，該角度範圍對應於0.01球面度的一立體角。該銅帶及該MCP前面係相對於共用外部接地而偏壓至-100 V，因此二次電子將不會進入該MCP偵測器。

該偵測器係定位於距離該樣本30 mm處。該馬達允許該MCP偵測器相對於該樣本旋轉，以偵測採用各種角度離開該樣本表面的氦離子及/或中性原子。一般而言，例如，該馬達允許該MCP完全旋轉大約180°。

該樣本係直徑大約為1 mm的一銅球。該馬達係相對於該樣本而定位，使得該樣本沿該馬達軸之軸向而定位。由於該樣本表面形狀，當曝露於該氦離子束時，該銅球樣本以各種角度提供散射氦離子及中性氦原子。即，藉由橫跨該樣本表面掃描入射氦離子束，可實現各種不同入射角(例如在該氦離子束與該樣本表面之一法線之間的角度)。例如，在該銅球中心處，該氦離子束之入射角為0°。在該球邊緣處(從該氦離子束角度觀察)，入射角大約為90°。在

該中心與該銅球邊緣之間中間的一位置，根據簡單的三角法，入射角大約為30°。

該樣本係定位於該氦離子束下面，而該偵測器係相對於該樣本而定位，如上所述。該氦離子束電流為15 pA而該氦離子束中的平均離子能量為25 keV。將一最大電壓100 V施加至該等掃描偏轉器以在該樣本表面處實現一1 mm的視場。從該顯微鏡系統之第二透鏡至該樣本之距離(例如工作距離)為75 mm。此點提供足夠開放的空間以允許該MCP偵測器相對於該樣本旋轉。

該等測量係藉由記錄該銅球之影像，同時該偵測器相對於該樣本以一半球弧掃過一180°角度範圍來執行。該氦離子束有效地將該樣本表面分割成兩側，且由於該銅球之凸面表面，因此僅能從該偵測器定位側來偵測散射氦離子及中性氦粒子。因此，在圖69A中，該樣本影像之強度輪廓顯現為月牙狀，在左側的明亮區域對應於偵測器位置。該樣本之右側相對較暗，由於散射氦離子及中性氦粒子離開該樣本表面，在方向上使該偵測器無法測量到其。

藉由遞增各影像之間的偵測器角度來記錄該樣本之連續影像。跨越該偵測器之掃描範圍，總共獲取20個樣本影像。某些影像不提供有用資訊，因為該偵測器係定位使得其阻隔入射氦離子束，從而阻止氦離子入射在該樣本表面上。圖69B及69C所示之影像分別對應於該偵測器幾乎直接定位於該樣本上方及該樣本右側上面所記錄之樣本影像。在圖69C中，觀察到一月牙狀強度輪廓，其類似於圖

69A中所觀察到的輪廓。

基於該等記錄影像之定性檢查，顯然可從該偵測器在軸外位置所測量之影像(例如圖69A及69C)決定關於該樣本之拓撲資訊。從該些測量所獲取之資訊可組合該樣本之二次電子測量以(例如)確定在該等二次電子影像中觀察到的影像對比度是否由於該樣本之表面拓撲所引起，或由於另外對比度機制(例如樣本放電或材料組成)所引起。在該偵測器處於一已知位置之情況下，可基於該等記錄影像來區別在該樣本表面上的一隆起與一下陷。針對各記錄影像的較小偵測器接受角度及該偵測器之已知位置還可用於藉由測量該影像中表面特徵之陰影長度並利用該入射氦離子束相對於該等表面特徵之已知角度來決定針對該樣本之定量表面地貌(例如高度)資訊。

該樣本之影像還揭示：取決於該偵測器相對於該樣本之定位，該樣本之特定邊緣展現一明亮邊緣效應，而其他邊緣則展現一黑暗邊緣效應(例如參見圖69A)。該資訊係用於設計一偵測器，該偵測器係配置成用以減小來自一樣本之拓撲資訊之測量。該偵測器設計平衡該等偵測角度以提供一幾乎均勻的邊緣效應。因此，一樣本(例如一銅球)之影像將均勻地顯現明亮，而強度變更由於樣本材料差異所引起。

分析從該樣本所記錄之影像資料以決定該樣本表面之選定區域之強度如何隨著掃描該偵測器變化。強度變更係由於離開該樣本表面之氦離子及氦中性原子之角度分佈所引

起，且此分析提供關於角度分佈(有時稱為發射葉)之資訊。

圖70A顯示該偵測器幾乎與該入射氦離子束同軸所記錄之樣本之一影像；即，該偵測器以一幾乎0°的角度測量散射氦離子及中性氦原子。該樣本表面之一區域(表示為矩形方框)係在一系列影像中隔離並受進一步分析。在圖70B所示之圖式中，較粗的水平線示意性表示該樣本之表面，而較細的垂直線表示入射氦離子束。該等點表示在各種偵測器位置平均測量的散射氦離子及中性氦原子強度。該等點係以一極性尺度繪製，其中該極性曲線之原點係該氦離子束在該樣本表面上的入射點。一給定點之角度位置對應於該偵測器之角度位置，而從該原點至各點之放射狀距離表示在該特定角度偵測器位置的平均測量強度。分析該樣本之個別影像(各對應於一不同偵測器位置)以提供如圖70B所示之角強度資料。各點對應於在一不同偵測器位置所記錄的一影像。

極性點陣形成一發射葉圖。該圖式在形狀上大約為圓形(除了該偵測器阻隔該氦離子束的某些遺失點)，並對應於圍繞該原點的一餘弦分佈。

在圖71A中，顯示該樣本之一影像，其具有表示該樣本之一不同區域的一疊加矩形方框，該區域係使用多個樣本影像分析以決定從該樣本所散射之氦離子及中性原子之角強度分佈。在此情況下，散射或發射角相對於該入射氦離子束為大約40°。

圖71B所示之角發射強度之極性曲線係採用結合上述圖70B所述之方式而構造。在此角度下的該等葉之形狀指示優先遠離該入射氦離子束而導引散射/發射。

在該樣本表面之各種不同區域(對應於各種不同角度)上重複此分析以為該銅球樣本建立散射氦離子及中性氦原子分佈作為角度之一函數的一相對全面描述。

14.

一尖端係遵照範例1所述之一程序而製備，且如範例1所述執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM中銳化該尖端。然後安裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。按範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該顯微鏡系統係配置成用以測量回應入射氦離子從一樣本所散射之氦離子及中性氦原子。一MCP偵測器(如範例3所述)用於記錄樣本影像。該MCP之前端係相對於共用外部接地偏壓至-300 V，如在其前面的格柵。在此組態下，二次電子由於該負施加的電位偏壓而不到達該MCP。該MCP所測量之信號由於入射在該MCP正面的散射氦離子及中性氦原子所引起。從該樣本角度看，該MCP在大約1.8球面角的一立體角範圍內偵測氦離子及氦原子。該立體角在方位角上相對於入射光束對稱，如圖66所示。

從範例13，針對該銅球樣本所觀察到的該等明亮及黑暗邊緣效應提供關於一偵測器之設計及組態之資訊，當用於

藉由測量散射氦離子及/或中性氦原子成像一樣本時，該資訊減小在該等測量信號中的拓撲資訊之數量，並更精確地反映材料組成差異而非該樣本之局部表面拓撲差異。對於圖66所示之MCP偵測器而言，在該MCP係定位於距離該樣本大約25 mm的一工作距離處之情況下，觀察到基於散射氦離子及中性氦原子測量所形成之影像中的一拓撲資訊減小。

然後可成像包括不同材料之樣本且視覺上可靠地相互區分該等材料。使用該氦離子顯微鏡成像包括四種不同材料(一鎳基底層、一碳塗層、一銅格柵及一金導線)的一樣本。氦離子束電流為1.1 pA而平均氦離子能量為18 keV。將4 V的最大電壓施加至該等掃描偏轉器以在該樣本表面實現一40 μm的視場。總得影像獲取時間為90秒。

產生影像如圖72所示。針對該樣本中的四種不同材料觀察到不同強度。此點係由於入射在一特定材料之一氦離子之散射機率取決於該材料之原子量。在圖72中，甚至可區分具有類似原子量的材料。例如，可視覺區分銅(原子量29)與鎳(原子量28)。

圖73顯示包括位於一矽晶圓下面的一銅層之一樣本之一影像，一氧化物層位於該晶圓上面。使用一氦離子顯微鏡系統來測量該影像，該氦離子顯微鏡系統係配置成用於測量散射氦離子及中性氦原子，如此範例中先前所述。該樣本包括表面結構性特徵，其係藉由導引一雷射入射在該樣本表面來產生。該雷射引起該下面銅層之一爆炸性噴發。視覺檢查該影像揭示由於該樣本中存在的不同材料所引起

的對比度(例如影像強度變更)。從多個影像(例如圖73所示之影像)，可決定一樣本中的不同材料分佈。

15.

遵照範例1所述之一程序製備一尖端，且如範例1所述執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM中銳化該尖端。然後安裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。按範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該顯微鏡系統係配置成用以測量回應入射氦離子束從一樣本所發射之光子。該樣本之一影像係根據一光電倍增管(型號R6095，日本Toyooka的Hamamatsu Photonics K.K.公司)所產生之信號來構造。該光電倍增管具有一末端開啟窗口、一相對較高的量子效率及從200 nm至700 nm的一寬廣頻譜回應。該管係使用一信號增益來操作，該信號增益可增加直至1200 V，或至輸出信號無過多飽和地到達信號鏈的白雜訊位準的程度。該光電倍增管係定位於距離該樣本15 mm處並定向以面向該樣本。在此組態中，該管對向大約2球面度的一立體角。

使用該光電倍增管偵測器來成像一氯化鈉(NaCl)樣本。為了該些測量，氦離子束電流為10 pA而平均氦離子能量為25 keV。使用每像素500 μs的一停留時間來光柵掃描該樣本。將一最大電壓150 V施加至該等掃描偏轉器以在該樣本表面處產生一1.35 mm的視場。

該樣本之一影像如圖74所示。影像對比度(例如影像強度變更)在不同NaCl晶體中較明顯。可經由兩種不同機制在該樣本中產生光子。首先，可經由類似於在SEM影像中所觀察到的陰極發光之程序來產生光子。在此機制中，將該樣本之原子激發至更高位能量狀態。在後續去激發程序期間發射光子。當來自入射離子束之氦離子返回至低位元能量狀態時，發射光子。

已曝露於該氦離子束並從其已偵測到發射光子之其他範例包括塑膠、閃爍物及有機材料。

16.

遵照範例1所述之一程序製備一尖端，且如範例1所述執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM中銳化該尖端。然後安裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。按範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該尖端係相對於該擷取器在+19 kV下偏壓，並在一2×10^{-5} Torr壓力下在該尖端附近引入氦氣體。將一法拉第杯放置於該第二透鏡之外，並使用該第一透鏡及對齊偏轉器來聚焦該光束，使得源自該等尖端三聚物原子之一者的實質上所有氦離子均穿過該孔徑(直徑600 μm，距離該尖端370 mm定位)，且該孔徑阻止源自其他兩個三聚物原子之實質上全部氦離子。在穿過該孔徑之後，該第一透鏡將該氦離子束聚焦於該法拉第杯內。在此組態下，關閉該像

散校正器、該等掃描偏轉器及該第二透鏡。

使用一微量電流計(型號487，俄亥俄州Cleveland 市Keithley Instruments公司)以及該法拉第杯測量源自該尖端原子之總氦離子電流為300 pA。該法拉第杯係一圓柱形金屬杯，其具有大約6比1的一深度對直徑比率。

其後，關閉該第一透鏡。在該尖端處所產生的該等氦離子之各氦離子繼續以一直線穿行，從該尖端發散。該孔徑攔截大多數氦離子束並僅允許其一較小中心部分進一步經過該離子行之其他部分。使用該法拉第杯來偵測穿過該孔徑之該氦離子部分，產生穿過該孔徑的一測量氦離子電流5 pA。該氦離子束之角強度係計算為穿過該孔徑之氦離子束電流(5 pA)除以從該尖端角度的該孔徑之立體角。該尖端頂點與該孔徑所形成之圓錐之半角係計算為$\tan^{-1}(0.300/370)=0.046°=8.1\times10^{-4}$弧度。該對應立體角係計算為$2.1\times10^{-6}$球面角(sr)。基於該立體角，該氦離子束之角強度係決定為2.42 μA/sr。

該氦離子源之亮度係根據該氦離子束角強度與該虛擬來源大小來決定。該虛擬來源大小係藉由檢查在銳化該尖端期間所記錄之尖端之一FIM影像來估計。根據此影像，顯然對應於該等尖端三聚物原子之個別離子化圓盤不重疊。此外，從鎢結晶學已知該等三聚物原子分離大約5埃。因此，實際的離子化圓盤係估計為具有大約3埃的一直徑。

該虛擬來源大小一般比實際離子化面積小。該虛擬來源大小係使用前述的一般程序來決定：一旦離子超出離子源

之電場區域(例如在該尖端及該擷取器附近的區域)，便藉由背投射100個氦離子之漸進軌道。該等背投射軌道越來越相互靠近地移動，直至其穿過一空間區域，在該空間區域內其相對於彼此最靠近地間隔，然後其再次發散。該等背投射軌道之最靠近間隔之圓形直徑係定義為虛擬來源大小。

作為一上限，吾人使用一3埃的值用於該虛擬來源之直徑。在該顯微鏡係配置成用以僅允許源自一單一尖端原子之氦離子束之一部分穿過該孔徑之情況下，該虛擬來源大小可以係相當程度地更小。該亮度係計算為將角強度除以虛擬來源大小面積A，即($A=\pi(D/2)^2$)。該離子源之亮度為3.4×10^9 A/cm^2sr。

該減小亮度係計算為該亮度除以用於擷取離子束之電壓(例如施加至該尖端之電壓偏壓)。該尖端至擷取器電壓為19 kV，而該減小亮度為1.8×10^9 A/m^2srV。

該展度係氦離子束虛擬源大小與其角發散之乘積之一測量(作為一立體角)。使用上述決定的亮度，該展度係決定為1.5×10^{-21} cm^2sr。

減小展度係乘以氦離子束電壓之展度。基於上述計算的展度，該減小展度係(使用+19 kV的尖端偏壓電壓)決定為2.8×10^{-17} cm^2srV。

17.

一尖端係遵照範例1所述之一程序製備，且如範例1所述執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受

使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM中銳化該尖端。然後安裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。按範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該顯微鏡系統係配置成用以使用一ET偵測器來測量二次電子。該偵測器係垂直定位於距離該樣本10 mm處(平行於氦離子束)，側向離該樣本25 mm遠，並傾向該樣本。該ET絲網係相對於共用外部接地在一+300 V電位下偏壓。

氦離子束電流為1 pA而氦離子束中的平均離子能量為22 keV。使用每像素100 μs的一停留時間，橫跨該樣本表面來光柵掃描該氦離子束。將一最大電壓100 mV施加至該等掃描偏轉器以在該樣本表面處產生一1000 nm的視場。

該樣本包括形成於一碳基板表面上的金島狀物，且購自Structure Probe Inc.公司(賓夕法尼亞州West Chester市)。使用上述測量組態所記錄之樣本之一影像如圖75所示。該樣本影像之一區域(表示為在圖75中影像上疊加的矩形)係選擇以檢查使用該氦離子顯微鏡所觀察到的邊緣對比度之品質。指定為一矩形之區域包括一幾乎垂直金邊緣。該區域包括20列，各列具有57個像素。該選定區域之一展開圖如圖76所示。

如下個別分析各列選定影像區域。首先，為了減小雜訊，使用MathCAD ksmooth函數(麻塞諸塞州Needham市PTC公司)，使用帶寬3像素的一高斯捲積平滑各列。圖77顯示一曲線圖，在其上繪製在平滑(點)之前及在平滑(曲

線)之後針對一特定線(線#14)的像素強度值。垂直軸對應於影像強度，範圍在0(黑)至255(白)之間變化。水平軸對應於像素數目，範圍在0(左邊緣)至57(右邊緣)之間變化。

對於在該影像之選定區域內的各強度線掃描，左至右亮暗轉換之中心係藉由尋找該強度線掃描之第一導數之最小值來決定。對於具有一左至右暗亮轉換之邊緣，已藉由決定該強度線掃描之第一導數之最大值位置來找到轉換中心。

然後微調各線以正好包含21個像素。該微調操作使得在各線中保留該轉換點、在該轉換點之前的10個像素、及在該轉換點之後的10個像素。用於在每個微調線內的前五個像素的強度值係一起平均化且將該平均值識別為100%值。用於在各微調線內的最後五個像素的強度值係一起平均化且將該平均識別為0%值。然後根據該等100%及0%值重新比例縮放來自各線掃描之光滑資料。來自圖77之重新比例縮放資料如圖78所示。

參考圖78，參考該等0%及100%值，決定該等75%及25%值。隨後決定該氦離子束之光點大小為沿該等25%值與75%之間水平軸的分離。基於圖78中的資料，光點大小係決定為3.0個像素。使用在該測量組態中已知的視場及該影像中的像素數目將該像素大小轉換成奈米。對於此測量，該視場為641 nm，且跨越該視場存在656個像素。因此該氦離子束之光點大小係決定為2.93 nm。針對在該影像之選定區域內的該等20個線之各線重複此點，並平均化

結果以產生2.44 nm的一平均氦離子束光點大小。

18.

一尖端係遵照範例1所述之一程序製備，且如範例1所述執行幾何尖端特性之特徵化。基於範例1內的標準可接受使用該尖端。

使用範例1所述之程序在該FIM中銳化該尖端。然後安裝並配置該尖端於該氦離子顯微鏡內。按範例1所述配置該顯微鏡系統，組態變更如下所述。

該顯微鏡系統係配置成用以測量回應入射氦離子離開一樣本表面之散射氦離子及中性氦原子。如範例3所述之一MCP偵測器係定位於距離該樣本10 nm處。將相對於外部接地的一0 V電位偏壓施加至該MCP格柵及正面。

氦離子束電流為1 pA而平均氦離子束能量為26 keV。使用每像素100 μs的一停留時間，在該樣本表面上光柵掃描該氦離子束。將一最大電位1.30 V施加至該等掃描偏轉器以在該樣本表面處產生一13 μm的視場。

該樣本(其包括一矽晶圓基板，表面特徵由多晶矽形成)稱為Metrocal，購自Metroboost公司(加利福尼亞州Santa Clara市)。該樣本係定位使得該氦離子束以垂直於該樣本表面的一角度入射。該樣本係相對於共用外部接地而偏壓至+19.4 kV，故在入射離子束中的氦離子以6.6 keV的一著陸能量到達該樣本。在該樣本與該MCP偵測器之間的較大電場防止二次電子到達該偵測器。在該電場影響下，實質上所有離開該樣本的二次電子均返回至該樣本表面。因

此，該MCP偵測器測量散射氦離子及中性原子。該偵測器所測量之中性氦原子具有6.6 keV的一最大能量，而該偵測器所測量之氦離子係加速直至26 keV的一最大能量直至其到達該MCP時為止。

圖79顯示使用上述測量組態所記錄之樣本之一影像。在該樣本表面上的各種特徵均具有相對均勻的測量強度，且不同於該基板之強度。視覺檢查該等表面特徵之邊緣揭示不存在可引起信號鏈飽和並可使該邊緣之位置難以發現的任何明顯明亮邊緣效應(例如邊緣浮散)。此外，在該樣本表面視覺上無充電假影跡象存在，此類假影(若存在的話)將在影像中表現為電壓對比度。

透過該等樣本表面特徵之一者的一水平線掃描如圖80所示。該線掃描之水平軸顯示像素數目，而垂直軸指示在特定像素的測量影像強度。出於比較目的，以30,000 X的一放大倍率(對應於大約13 μm的一視場)，使用3 keV的一束能量及30 pA的一束電流，在一肖特基場發射SEM(AMRAY型號1860)中成像相同的樣本。所產生影像如圖81所示，且透過在圖80中掃描的相同特徵的一水平掃描線如圖82所示。

圖82中的線掃描顯示明顯明亮邊緣效應，在該成像表面特徵之該等邊緣處的信號鏈幾乎飽和。在該表面特徵之主體中，該SEM線掃描不顯示一相對均勻穩態強度位準。相反，在該特徵主體內的強度位準要麼減小，要麼在該特徵中心處的一較小區域內隨處增加。最後，該SEM線掃描之

不對稱性指示在SEM曝露期間該表面特徵之時間依賴充電正在發生。相比之下，偵測散射氦離子及中性氦原子所記錄之特徵之線掃描影像顯示相當程度減小的邊緣效應，且無任何明顯充電假影。

可能還已執行在該樣本表面上一特定特徵之多個測量。若進行一特徵之多個測量，則可能會確定關於該測量特徵尺寸之統計資料。例如，可能已測量平均特徵寬度、特徵寬度之標準偏差及/或該特徵之該第一邊緣及/或該第二邊緣之平均及標準偏差。還可使用傅立葉方法來分析一或多個特徵之該等邊緣之位置以決定對應於該等邊緣形狀之空間波長之頻譜。

19.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內，將該樣本固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係配置成用以將該樣本表面上的一100 μm^2 FOV曝露於一氦離子束，該氦離子束具有1 pA的一束電流，20 keV的一平均離子能量及在該樣本表面上該FOV 0.1%的一束光點大小。

為了測量該樣本之結晶資訊，在該樣本表面之FOV區域上，採用離散步驟光柵掃描該氦離子束。一二維偵測器係用於在各步驟捕捉從該樣本表面散射之氦離子之一影像。各二維影像對應於在該樣本表面上的一特定位置處的一菊池圖案。基於該菊紋圖案，可決定在該位置的該樣本之晶體結構、晶格間隔及晶體定位。藉由以離散步驟遍及該

FOV測量菊池圖案，獲得該樣本表面晶體結構之一完整地圖。

為了測量該樣本之拓撲資訊，一偵測器係配置成用以測量回應入射氦離子束所產生的來自該樣本之二次電子之一總強度。在該樣本表面之整個FOV區域上以離散步驟光柵掃描該氦離子束，總二次電子強度係測量為該氦離子束在該樣本表面上之位置的一函數。然後使用測量的結晶資訊來移除由於該樣本中晶體結構變更所引起的對二次電子強度測量的貢獻。該校正後的總二次電子強度值用於構造該樣本之一灰階影像，其中在一特定影像像素處的灰度係由在該樣本上的一對應氦離子束位置處的校正二次電子強度來決定。該影像提供拓撲資訊，其顯示在該FOV中的樣本表面地貌圖案。

20.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內，將該樣本固定於在一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

為了測量該樣本之結晶資訊，在該樣本表面之FOV區域上，採用離散步驟光柵掃描該氦離子束。一偵測器用於測量散射氦離子之一總豐度作為在該樣本表面上的氦離子束位置之一函數。該測量的總豐度值用於構建該樣本之一灰階影像，其中在一特定影像像素處的灰度係由在該樣本上的一對應氦離子束位置之氦離子總測量豐度來決定。在該樣本表面處不同定向的晶體顆粒具有不同的散射氦離子產

率，而該影像將不同定向的晶體顆粒顯示為可變灰度。使用該影像中的資訊，可在該樣本表面識別晶體顆粒及顆粒邊界。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例19所述測量總二次電子強度。然後使用該測量的結晶資訊來移除由於樣本中晶體結構變更所引起的對二次電子強度測量的貢獻。該校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之一灰階影像，其中在一特定影像像素處的灰度係由在該樣本上的一對應氦離子束位置處的校正二次電子強度來決定。該影像提供拓撲資訊，其顯示在該FOV中的樣本表面地貌圖案。

21.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內，將該樣本固定於在一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

為了測量該樣本之結晶資訊，在該樣本表面之FOV區域上，採用離散步驟光柵掃描該氦離子束。一偵測器用於測量散射氦離子之一總豐度作為在該樣本表面上的氦離子束位置之一函數。該測量的總豐度值用於構建該樣本之一灰階影像，其中在一特定影像像素處的灰度係由在該樣本上的一對應氦離子束位置氦離子之總測量豐度來決定。在該樣本表面處不同定向的晶體顆粒具有不同的散射氦離子產率，而該影像將不同定向的晶體顆粒顯示為可變灰度。使用該影像中的資訊，可在該樣本表面識別晶體顆粒及顆粒邊界。一旦已識別在該樣本表面上的該等顆粒邊界，便在

該樣本表面上從一顆粒至另一顆粒掃描該氦離子束。在該氦離子束之各位置，一二維偵測器用於捕捉從該樣本表面所散射之氦離子之一影像。對於在該樣本表面處的一特定晶體顆粒，各二維影像對應於一菊池圖案。基於該菊池圖案，可決定該顆粒之晶體結構、晶格間隔及晶體定位。藉由遍及該FOV針對各顆粒而非在各像素處測量一單一菊池圖案，短時間內獲得該樣本表面晶體結構之一完整地圖。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例19所述測量總二次電子強度。然後使用該測量的結晶資訊來移除由於樣本中晶體結構變更所引起的對二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於該樣本之一灰階影像，其中在一特定影像像素處的灰度係藉由在該樣本上的一對應氦離子束位置處的校正二次電子強度來決定。該影像提供拓撲資訊，其顯示在該FOV中的樣本表面地貌圖案。

22.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例19所述測量該樣本之結晶資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，一偵測器係配置成用以測量回應入射氦離子束所產生的來自該樣本之二次電子之一總強度。相對於該氦離子束傾斜該樣本，使得該氦粒子束以一非垂直角入射至該樣本表面。在該樣本表面之整個FOV區域上採用離散步驟光柵掃描該氦離子束，且總二次

電子強度係測量為該氦離子束在該樣本表面上之位置的一函數。然後使用該測量的結晶資訊來移除由於該樣本中晶體結構變更所引起的對二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總強度值用於構造該樣本之一灰階影像，其中在一特定影像像素處的灰度係藉由在該樣本上的一對應氦離子束位置處的校正後二次電子之總強度來決定。該影像提供拓撲資訊，其顯示在該FOV中的樣本表面地貌圖案。相對於該氦離子束傾斜該樣本可揭示拓撲資訊，否則若該氦離子束僅以垂直角度入射在該樣本表面，則其仍保持隱藏。

視需要，然後可調整樣本傾斜度，使得該氦離子束以一不同非垂直角度入射在該樣本表面，且在該樣本表面之整個FOV區域上以離散步驟光柵掃描該氦離子束。總二次電子強度係測量為該氦離子束在該樣本表面上位置的一函數，並將該測量的結晶資訊用於移除由於該樣本中晶體結構變更所引起的對該等二次電子強度測量之貢獻。該等校正後的二次電子強度值用於構造該樣本之一第二灰階影像，其對應於該氦離子束之第二非垂直入射角，其中在一特定影像像素處的灰度係藉由在該樣本上的一對應氦離子束位置處的校正後二次電子之總強度來決定。然後可組合來自以不同氦離子束入射角測量的該等二影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

23.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當

位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例20所述測量該樣本之結晶資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例22所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的結晶資訊來移除由於該樣本中晶體結構變更所引起的對採用各離子束入射角度的二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例22所述。然後可組合來自以不同氦離子束入射角測量的該等二影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

24.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例192所述配置。

如範例21所述測量該樣本之結晶資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例22所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的結晶資訊來移除由於該樣本中晶體結構變更所引起的對採用各離子束入射角度的二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例22所述。然後可組合來自以不同氦離子束入射角測量的該等二影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

25.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例19所述測量該樣本之結晶資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，二或多個偵測器係配置成用以測量回應入射氦離子束所產生的來自該樣本之一總二次電子強度，各偵測器相對於該樣本以一不同角度及位置定向。在該樣本表面之整個FOV區域上採用離散步驟光柵掃描該氦離子束，且總二次電子強度係藉由各偵測器測量為該氦離子束在該樣本表面之位置之一函數。然後使用該測量的結晶資訊來移除由於樣本中晶體結構變更所引起的對在各偵測器處二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總強度值用於構造該樣本之一系列灰階影像，各影像對應於該等偵測器之一者，其中在一特定影像內一特定像素處的灰度係藉由在該樣本上的一對應氦離子束位置處的校正後總二次電子強度來決定。然後可組合來自該等多個偵測器所測量之該等影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

26.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例20所述測量該樣本之結晶資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例25所述測量來自該

樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的結晶資訊來移除由於樣本中晶體結構變更所引起的對在各偵測器處二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例25所述。然後可組合來自該等多個偵測器所測量之該等影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

27.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例21所述測量該樣本之結晶資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例25所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的結晶資訊來移除由於樣本中晶體結構變更所引起的對在各偵測器處二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例25所述。然後可組合來自該等多個偵測器所測量之該等影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

28.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例19所述測量該樣本之結晶資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，配置成用以測量氦離子之

一偵測器係定位以偵測以較大散射角從該樣本表面所散射之氦離子。在該樣本表面之整個FOV區域上採用離散步驟光柵掃描該氦離子束，且總氦離子豐度係藉由該偵測器測量為該氦離子束在該樣本表面上之位置之一函數。該等總豐度值用於構造該樣本之一灰階影像，其中在一特定影像像素處的灰度係藉由在該樣本上的一對應氦離子束位置處之總測量的散射氦離子豐度來決定。該影像提供拓撲資訊，其顯示在該FOV中的樣本表面地貌圖案。

29.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例20所述測量該樣本之結晶資訊。

如範例28所述測量該樣本之拓撲資訊。

30.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例31所述測量該樣本之結晶資訊。

如範例28所述測量該樣本之拓撲資訊。

31.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例19所述測量該樣本之結晶資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，配置成用以測量氦離子之二或多個偵測器係定位以偵測以較大散射角從該樣本表面所散射之氦離子。在該樣本表面之整個FOV區域上採用離散步驟光柵掃描該氦離子束，且總氦離子豐度係藉由該等偵測器之各偵測器測量為該氦離子束在該樣本表面上之位置之一函數。該等總豐度值用於構造該樣本之灰階影像，其對應於該等偵測器之各偵測器，其中在一特定影像像素處的灰度係藉由在該樣本上一對應氦離子束位置處的總測量的散射氦離子豐度來決定。然後可組合來自該等偵測器所測量之該等多個影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

32.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例20所述測量該樣本之結晶資訊。

如範例31所述測量該樣本之拓撲資訊。

33.測量一樣本之拓撲及結晶資訊

為了測量一樣本之拓撲及結晶資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例21所述測量該樣本之結晶資訊。

如範例31所述測量該樣本之拓撲資訊。

34.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

為了測量該樣本之材料資訊，配置成用以測量氦離子之一偵測器係定位以偵測從該樣本所背散射之氦離子。在該樣本表面之整個FOV區域上採用離散步驟光柵掃描該氦離子束，且總背散射氦離子豐度係測量為該氦離子束在該樣本表面之位置之一函數。該等總背散射氦離子豐度測量用於構造該樣本之一灰階影像，其中在一特定影像像素處的灰度係藉由在該樣本上一對應氦離子束位置處的總測量的背散射氦離子豐度來決定。因為氦離子散射斷面大致取決於散射原子之原子量之平方，在影像中的該等強度可用於定量決定該樣本之組成。

為了測量該樣本之拓撲資訊，一總二次電子強度係測量為在該氦離子束在該樣本上之位置之一函數，如範例19所述。然後使用該測量的材料資訊來移除由於該樣本中組成變更所引起的對總二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構造該影像之一灰階影像，其中在一特定影像處的灰度係藉由該等校正後總強度值來決定。該影像提供拓撲資訊，其顯示在該FOV中的樣本表面地貌圖案。

35.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所

述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例34所述，可測量一樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例22所述測量來自該樣本之總二次電子強度。然後使用該測量的材料資訊來移除由於該樣本中組成變更所引起的對採用各離子束入射角度的二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例22所述。然後可組合來自以不同氦離子束入射角測量的該等二影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

36.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例34所述，可測量一樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例25所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對在各偵測器處二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例25所述。然後可組合來自該等多個偵測器所測量之該等影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

37.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所

述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例34所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例28所述測量該樣本之拓撲資訊。

38.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例34所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例31所述測量該樣本之拓撲資訊。

39.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

為了測量來自該樣本之材料資訊，配置成用以測量氦離子之一能量及角度分解偵測器係定位以偵測來自該樣本之氦。在該樣本表面之整個FOV區域上採用離散步驟光柵掃描該氦離子束，且散射氦離子之能量及角度係測量為該氦離子束在該樣本表面之位置之一函數。根據該等散射氦離子之平均角度及能量，可決定該等散射原子之質量，並可決定該樣本之組成。

為了測量該樣本之拓撲資訊，一總二次電子強度係測量為該氦離子束在該樣本上之位置之一函數，如範例19所述。然後使用該測量的材料資訊來移除由於該樣本中組成

變更所引起的對總二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構造該影像之一灰階影像，其中在一特定影像處的灰度係藉由該等校正後總強度值來決定。該影像提供拓撲資訊，其顯示在該FOV中的樣本表面地貌圖案。

40.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例39所述，可測量該樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例22所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的材料資訊來移除由於該樣本中組成變更所引起的對採用各離子束入射角的二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例22所述。然後可組合來自以不同氦離子束入射角測量的該等二影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

41.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例39所述，可測量該樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例25所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的材料資訊來

移除由於樣本中組成變更所引起的對各偵測器處二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例25所述。然後可組合來自該等多個偵測器所測量之該等影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

42.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例39所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例28所述測量該樣本之拓撲資訊。

43.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例39所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例31所述測量該樣本之拓撲資訊。

44.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

為了測量材料資訊，一x射線偵測器可用於偵測回應入射氦離子束從該樣本所形成之x射線。在該樣本表面之整個FOV區域上採用離散步驟光柵掃描該氦離子束，且該x

射線發射頻譜係測量為該氦離子束在該樣本表面之位置之一函數。在x射線頻譜中的特定發射線專用於特定原子類型，故基於所測量的x射線頻譜，決定在該樣本表面上在各步驟的組成。

為了測量該樣本之拓撲資訊，一總二次電子強度係測量為在該氦離子束在該樣本上之位置之一函數，如範例19所述。然後使用該測量的材料資訊來移除由於該樣本中組成變更所引起的對總二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構造該影像之一灰階影像，其中在一特定影像處的灰度係藉由該等校正後總強度值來決定。該影像提供拓撲資訊，其顯示在該FOV的樣本表面地貌圖案。

45.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例44所述，可測量該樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例22所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對採用各離子束入射角的二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例22所述。然後可組合來自以不同氦離子束入射角測量的該等二影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

46.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例44所述，可測量該樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例25所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對在各偵測器處二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例25所述。然後可組合來自該等多個偵測器所測量之該等影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

47.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例44所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例28所述測量該樣本之拓撲資訊。

48.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例44所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例31所述測量該樣本之拓撲資訊。

49.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

為了測量材料資訊，一光子偵測器可用於偵測回應入射氦離子束從該樣本所形成之光子。在該樣本表面之整個FOV區域上採用離散步驟光柵掃描該氦離子束，且光子發射頻譜係測量為該氦離子束在該樣本表面之位置之一函數。在該頻譜中的特定發射線專用於特定原子類型，故基於所測量的頻譜，決定在該樣本表面上在各步驟的組成。

為了測量該樣本之拓撲資訊，一總二次電子強度係測量為在氦離子束在該樣本上之位置之一函數，如範例19所述。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對總二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構造該影像之一灰階影像，其中在一特定影像處的灰度係藉由該等校正後總強度值來決定。該影像提供拓撲資訊，其顯示在該FOV中的樣本表面地貌圖案。

50.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例49所述，可測量該樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例22所述測量來自該

樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對在各離子束入射角的二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例22所述。然後可組合來自以不同氦離子束入射角測量的該等二影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

51.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例49所述，可測量該樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例25所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對在各偵測器處二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例25所述。然後可組合來自該等多個偵測器所測量之該等影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

52.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例49所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例28所述測量該樣本之拓撲資訊。

53.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例49所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例31所述測量該樣本之拓撲資訊。

54.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

為了測量材料資訊，一歐傑電子偵測器可用於偵測回應入射氦離子束從該樣本所形成之歐傑電子。在該樣本表面之整個FOV區域上採用離散步驟光柵掃描該氦離子束，且該歐傑電子發射頻譜係測量為該氦離子束在該樣本表面之位置之一函數。在該頻譜中的特定發射線專用於特定原子類型，故基於所測量的頻譜，決定在該樣本表面上在各步驟的組成。

為了測量來自該樣本之拓撲資訊，一總二次電子強度係測量為在氦離子束在該樣本上之位置之一函數，如範例19所述。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對總二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構造該影像之一灰階影像，其中在一特定影像處的灰度係藉由該等校正後總強度值來決定。該影像提供拓撲資訊，其顯示在該FOV中的樣本表面

地貌圖案。

55.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例54所述，可測量該樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例22所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對採用各離子束入射角的二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例22所述。然後可組合來自以不同氦離子束入射角測量的該等二影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

56.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例54所述，可測量該樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例25所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對各偵測器處二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例25所述。然後可組合來自該等多個偵測器所測量之該等影像之資訊並用於決定關於該

樣本表面之定量三維地形資訊。

57.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例54所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例28所述測量該樣本之拓撲資訊。

58.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例54所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例31所述測量該樣本之拓撲資訊。

59.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

為了測量材料資訊，一TOF偵測器可用於偵測回應入射氦離子束從該樣本所形成之二次離子及/或原子。在該樣本表面之整個FOV區域上採用離散步驟光柵掃描該氦離子束，且來自樣本180之二次離子及或原子之飛行時間係測量為該氦離子束在該樣本表面之位置之一函數。基於該等離子/原子之測量飛行時間及在TOF儀器中加速電極之已知電壓，可計算該等偵測粒子之質量並可決定該等粒子之身份。

為了測量來自該樣本之拓撲資訊，一總二次電子強度係測量為在氦離子束在該樣本上之位置之一函數，如範例19所述。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對總二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構造該樣本之一灰階影像，其中在一特定影像處的灰度係藉由該等校正後總強度值來決定。該影像提供拓撲資訊，其顯示在該FOV中的樣本表面地貌圖案。

60.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例59所述，可測量該樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例22所述測量來自該樣本之總二次電子強度。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對在各離子束入射角的二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例22所述。然後可組合來自以不同氦離子束入射角測量的該等二影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

61.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例59所述，可測量該樣本之材料資訊。

為了測量該樣本之拓撲資訊，如範例25所述測量來自該樣本之二次電子之總強度。然後使用該測量的材料資訊來移除由於樣本中組成變更所引起的對各偵測器處二次電子強度測量的貢獻。該等校正後的總二次電子強度值用於構建該樣本之灰階影像，如範例25所述。然後可組合來自該等多個偵測器所測量之該等影像之資訊並用於決定關於該樣本表面之定量三維地形資訊。

62.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例59所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例28所述測量該樣本之拓撲資訊。

63.測量一樣本之拓撲及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例59所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例31所述測量該樣本之拓撲資訊。

64.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上之適當位置。該氣體場離子顯微鏡係配置成如範例192所述。

如範例44所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例19所述，可測量該樣本之結晶資訊。

65.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例44所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例20所述，可測量該樣本之結晶資訊。

66.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例44所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例21所述，可測量該樣本之結晶資訊。

67.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例49所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例19所述，可測量該樣本之結晶資訊。

68.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例49所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例20所述，可測量該樣本之結晶資訊。

69.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例49所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例214所述，可測量該樣本之結晶資訊。

70.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例54所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例19所述，可測量該樣本之結晶資訊。

71.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例54所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例20所述，可測量該樣本之結晶資訊。

72.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例54所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例21所述，可測量該樣本之結晶資訊。

73.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例59所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例192所述，可測量該樣本之結晶資訊。

74.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例59所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例20所述，可測量該樣本之結晶資訊。

75.測量一樣本之晶體及材料資訊

為了測量一樣本之拓撲及材料資訊，該樣本係在本文所述之一氣體場離子顯微鏡內固定於一樣本固定器上的適當位置內。該氣體場離子顯微鏡係如範例19所述配置。

如範例59所述，可測量該樣本之材料資訊。

如範例21所述，可測量該樣本之結晶資訊。

其他具體實施例不脫離申請專利範圍。

【圖式簡單說明】

圖1係一離子顯微鏡系統之示意圖。

圖2係一氣體場離子源之示意圖。

圖3係一尖端頂點之一具體實施例的一放大側視圖之示意表示。

圖4係圖3之該尖端的一放大側視圖之示意表示。

圖5係一氦離子顯微鏡系統之示意圖。

圖6係一W(111)尖端之一具體實施例的一放大俯視圖之示意表示。

圖7係圖6之該W(111)尖端的一放大側視圖之示意表示。

圖8係顯示一錐角測量的一尖端之側視圖。

圖9係顯示一曲率半徑測量的一尖端之側視圖。

圖10係顯示製造一尖端之一方法的一具體實施例之流程圖。

圖11A係用於一尖端的一支撐裝配件之一具體實施例的透視圖。

圖11B係圖11A之該支撐裝配件的仰視圖。

圖12係包含用於支撐一尖端之一Vogel底板的一支撐裝配件之一具體實施例的側視圖。

圖13係一氣體場離了源及離子光學之一具體實施例的示意圖。

圖14係一離子光學系統之一具體實施例的示意圖。

圖15係一多開口孔徑之一具體實施例的俯視圖。

圖16係一多開口孔徑之一具體實施例的俯視圖。

圖17係用於一氣體場離子顯微鏡尖端的一移動機制之一具體實施例的斷面圖。

圖18係一Everhart-Thornley偵測器之示意圖。

圖19係包含一微通道板偵測器的一氣體場離子顯微鏡系統之一部分的斷面圖。

圖20A及20B係藉由一碳表面支撐的一金島狀物之側視圖及俯視圖。

圖20C係與用於圖20A及20B之樣本的離子束位置成函數關係的平均測量二次電子總豐度之繪圖。

圖21係包含一氣體遞送系統的一氣體場離子顯微鏡之一部分的示意圖。

圖22係包含一流槍的一氣體場離子顯微鏡之一部分的示意圖。

圖23係包含一次表面電荷層的一樣本之示意圖。

圖24係用於減少一樣本上的表面電荷之一集極電極的示意圖。

圖25係用於減少一樣本上的表面電荷之一流槍裝置的示意圖。

圖26係包含用於減少一樣本上的表面電荷之一轉換板的一流槍裝置之示意圖。

圖27A係具有置放在其中的一帶正電層之一樣本的示意表示。

圖27B係具有置放在其中的帶正電及帶負電層之一樣本的示意表示。

圖28係一振盪去耦合式樣本操縱器之一具體實施例的示意圖。

圖29係一振盪去耦合式樣本操縱器之一具體實施例的示

意圖。

圖30係一振盪去耦合式樣本操縱器之一具體實施例的示意圖。

圖31係用於分離一粒子束中的離子與中性原子之一靜電濾波系統的示意圖。

圖32係用於分離一粒子束中的中性原子、單一帶電離子及雙倍帶電離子之一靜電濾波系統的示意圖。

圖33係包含用於分離一粒子束中的中性原子、單一帶電離子及雙倍帶電離子之無分散序列的電場及磁場之一濾波系統的示意圖。

圖34A係顯示自一表面的氦離子散射圖案之一具體實施例的示意圖。

圖34B係顯示藉由圖34A中的偵測器所偵測的散射氦離子之相對豐度的繪圖之圖。

圖35A、35D與35G係顯示自使用不同偵測器來偵測散射氦離子之一表面的氦離子散射圖案之個別具體實施例的示意圖。

圖35B、35E與35H係用於分別在圖35A、35D與35G中加以顯示之系統的總散射氦離子產率之繪圖。

圖35C、35F與35I係分別藉由圖35A、35D與35G中的偵測器加以偵測的散射氦離子之相對豐度的繪圖。

圖36係顯示包含用於測量自一樣本之散射離子的偵測器之一配置的一氣體場離子顯微鏡之一部分的示意圖。

圖37A至37D係一導電尖端之掃描電子顯微鏡影像。

圖38係一導電尖端之表面的數位化表示。

圖39係圖38中所示的表面之斜率的繪圖。

圖40係一導電尖端之場離子顯微鏡影像，該導電尖端在其頂點處具有作為終端架的三聚物。

圖41係一導電尖端之掃描場離子顯微鏡影像，該導電尖端在其頂點處具有作為終端架的三聚物。

圖42係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖43係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖44係一導電尖端之掃描場離子顯微鏡影像。

圖45係一導電尖端之場離子顯微鏡影像，該導電尖端在其頂點處具有作為終端架的三聚物。

圖46係一導電尖端之掃描電子顯微鏡影像。

圖47係一導電尖端之場離子顯微鏡影像。

圖48係一導電尖端之場離子顯微鏡影像。

圖49係一導電尖端之場離子顯微鏡影像。

圖50係一導電尖端之掃描場離子顯微鏡影像，該導電尖端在其頂點處具有作為終端架的三聚物。

圖51係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖52係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖53係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍

攝的一樣本之影像。

圖54係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖55係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖56係用於一尖端的一支撐件之示意表示。

圖57係用於一尖端的一支撐件之示意表示。

圖58係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖59A係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖59B係採用一掃描電子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖60係自一樣本的二次電子電流之曲線圖。

圖61A係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖61B係採用一掃描電子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖62係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖63係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖64係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖65係採用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖66係配置成偵測二次電子的一偵測器組態之具體實施例。

圖67A係基於圖59A中的影像之變動樣本位置處的二次電子強度之曲線圖。

圖67B係基於圖59B中的影像之變動樣本位置處的二次電子強度之曲線圖。

圖68係採用配置成偵測氦離子與中性氦原子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖69A至69C係採用配置成偵測氦離子與中性氦原子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖70A係採用配置成偵測氦離子與中性氦原子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖70B係顯示離開圖70A之影像的樣本之氦離子與氦原子的角強度之極性繪圖。

圖71A係採用配置成偵測氦離子與中性氦原子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖71B係顯示離開圖71A之影像的樣本之氦離子與氦原子的角強度之極性繪圖。

圖72係採用配置成偵測氦離子與中性氦原子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖73係採用配置成偵測氦離子與中性氦原子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖74係使用配置成偵測光子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖75係使用配置成偵測二次電子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖76係圖75之影像之一部分的展開圖。

圖77係與用於透過圖76之影像的線掃描之像素位置成函數關係的影像強度之繪圖。

圖78係在數值縮放與修剪操作之後圖77所示資料的繪圖。

圖79係採用配置成偵測氦離子與中性氦原子之一氦離子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖80係與用於透過圖79之影像之一部分的線掃描之像素位置成函數關係的影像強度之繪圖。

圖81係採用一掃描電子顯微鏡所拍攝的一樣本之影像。

圖82係與用於透過圖81之影像之一部分的線掃描之像素位置成函數關係的影像強度之繪圖。

各圖式中的相同參考符號指示相同元件。

【主要元件符號說明】

100	系統
110	氣體來源
120	氣體場離子源
130	離子光學
132	縱向軸線
133	入口開口

140	樣本操縱器
142	原子
144	原子
146	原子
148	離子化圓盤
150	前側偵測器
152	虛擬來源
154	線
156	軌道
160	背側偵測器
170	電子控制系統
172a-172f	通信線
180	樣本
181	表面
182	氣體
183	表面
186	尖端
187	尖端頂點
188	抑制器
190	擷取器
191	開口
192	離子束
192a	氦離子
192b	氦原子

192c	離子束
193	遠端
194	粒子
200	顯微鏡系統
202	第一真空外罩
204	第二真空外罩
206	尖端
207	軸線
208	尖端操縱器
216	第一透鏡
218	像散校正器
219	掃描偏轉器
220	對準偏轉器
221	掃描偏轉器
222	對準偏轉器
223	偏轉器
223a	偏轉器
223b	偏轉器
223c	偏轉器
224	孔徑
224a	孔徑
224b	孔徑
225	開口
225a-225g	開口

226	第二透鏡
227	樞軸點
228	遞送管
229a-229e	開口
230	流量調節器
232	溫度控制器
234	孔徑底板
236	真空幫浦
237	真空幫浦
280	樣本
300	尖端
302	W原子
304	W原子
502	軸
503	進口
504	圓頂
505	進口
506	箭頭
508	基座
510	側翼
512	表面
513	表面
514	轉移器
516	開口

518	表面
519	表面
520	裝配件
522a	柱子
522b	柱子
524	基座
526a	加熱器線路
526b	加熱器線路
528	先驅線路
550	支撐裝配件
552	安裝臂
554	間隔件
556	基座
600	ET偵測器
601	粒子選擇器
602	轉換材料
604	支撐件
606	光子偵測器
607	電壓來源
608	電壓來源
610	帶電粒子
612	光子
620	偵測器
622	表面

624	箭頭
730	遞送管
732	進口埠
734	真空幫浦
736	遞送噴嘴
840	流槍
842	電子束
843a	軌道
843b	軌道
843c	軌道
845	轉換板
846	電荷層
847	二次電子
848	法線
850	軌道
852	集極電極
854	導體
900	摩擦三角架
902	支撐圓盤
904	台
906	導針
908	驅動器
910	孔徑
1016	集極

1016b	集極
1016c	集極
1100	偵測器
1102	氦離子
1510	樣本固持器裝配件
1511	主體
1512	開口
1514	樣本台
1516	表面圓盤
1518	臂狀物
1520	夾具
1522	連接器
1524	孔徑
1600	三角架
1700	島狀物
1710	碳表面
1730	箭頭
1740	漸近線
1750	漸近線
1760	垂直線
1770	垂直線
2010	帶正電層
2012	二次電子
2014	自由電子

2016	負電荷層
7010	樣本
7012	區域
7013	表面
7014	區域
7015	表面
7016	區域
7017	表面
7020	散射圖案
7030	散射圖案
7040	散射圖案
7041	偵測器
7050	偵測器
8050	樣本
8052	區域
8053	表面
8054	區域
8055	表面
8056	區域
8057	表面
8058	區域
8059	表面
8061	表面
8070	散射圖案

8080	散射圖案
8090	散射圖案
80110	散射圖案
80120	半球形偵測器
80130	偵測器
80140	偵測器
He^{+}	離子
He^{2+}	離子

五、中文發明摘要：

本發明揭示離子源、系統及方法。

六、英文發明摘要：

十一、圖式：

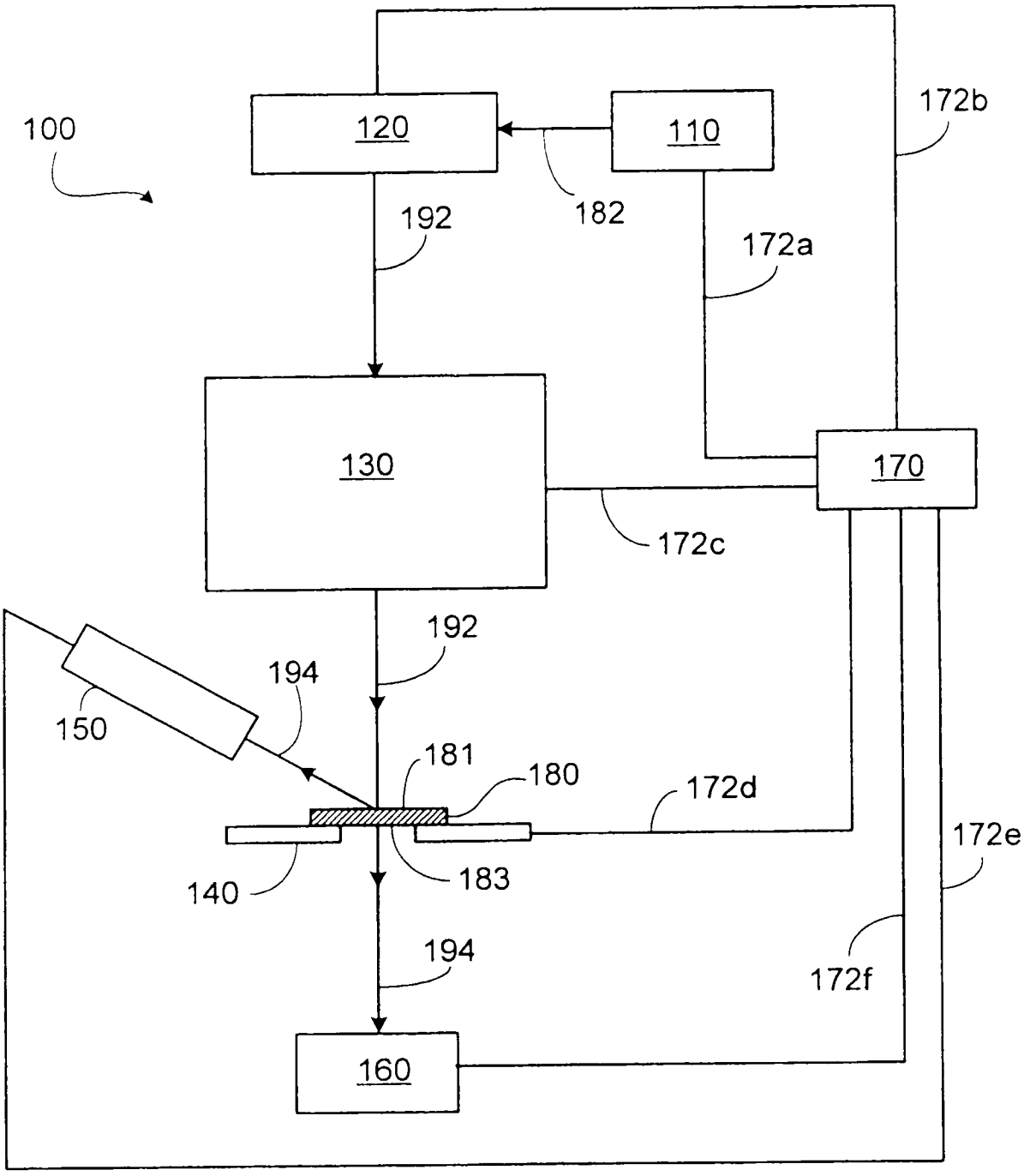

100
120
110
172b
182
192
172a
130
170
172c
192
194
150
181
180
172d
172e
140
183
194
172f
160

圖1

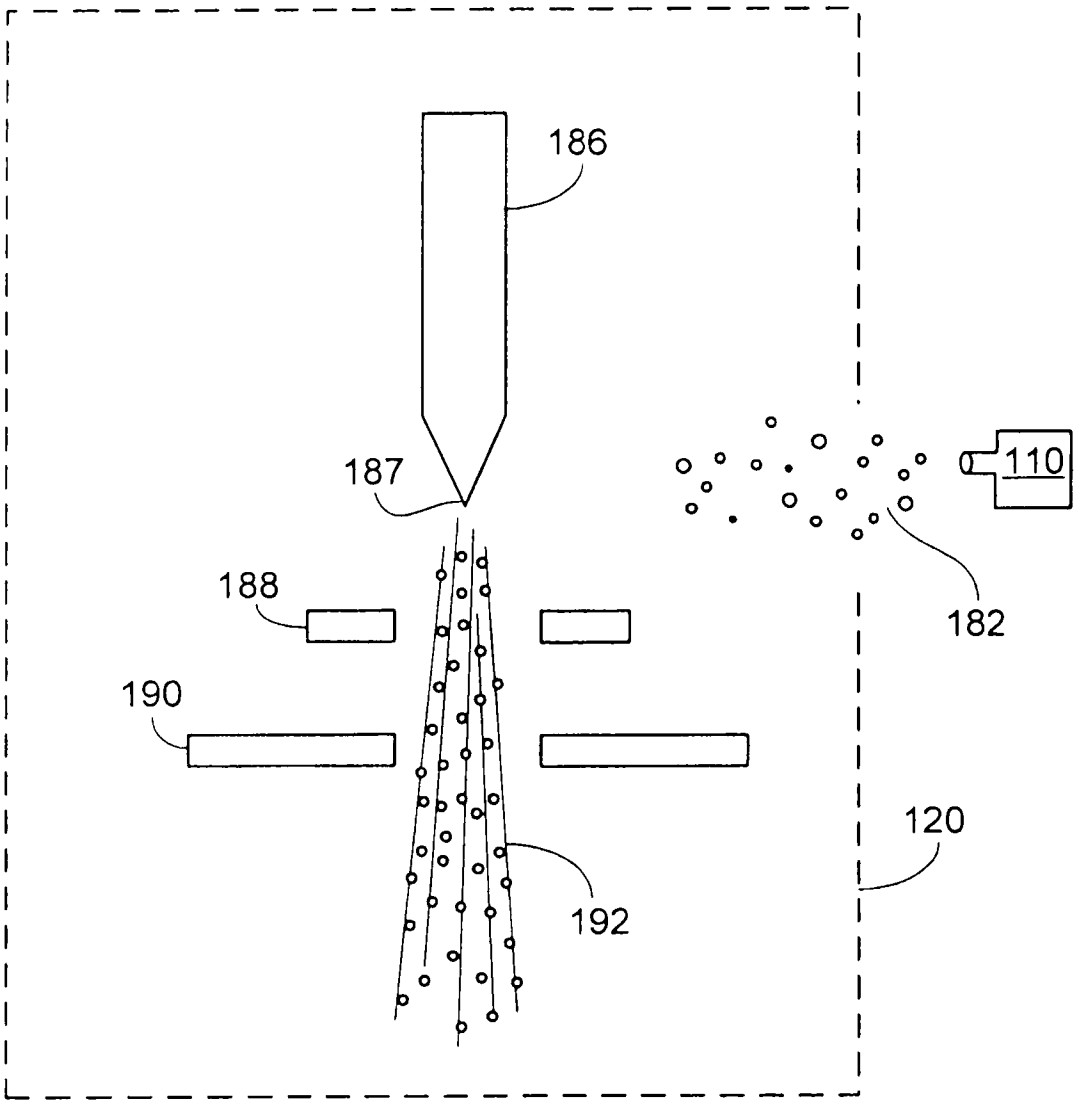


圖2

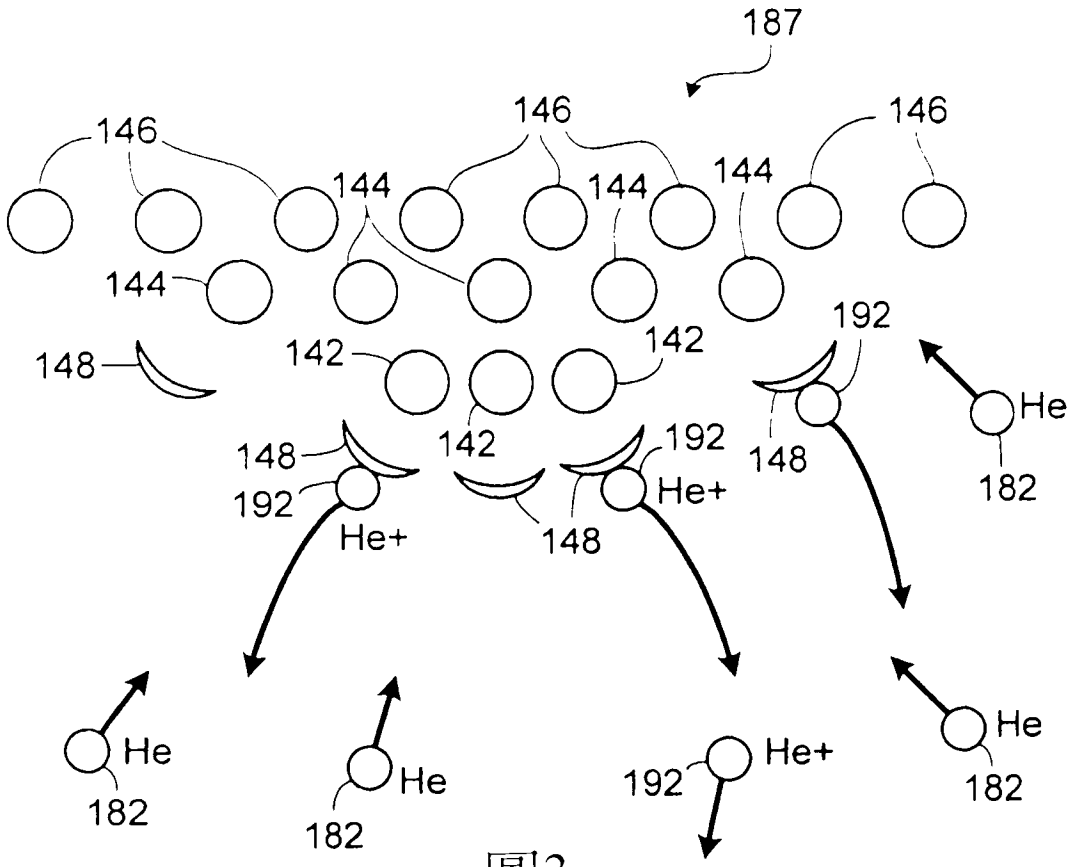

187
146
146
146
144
144
144
144
142
142
142
148
148
148
148
192
192
192
He+
He+
He
He
He
He
182
182
182
182

圖3

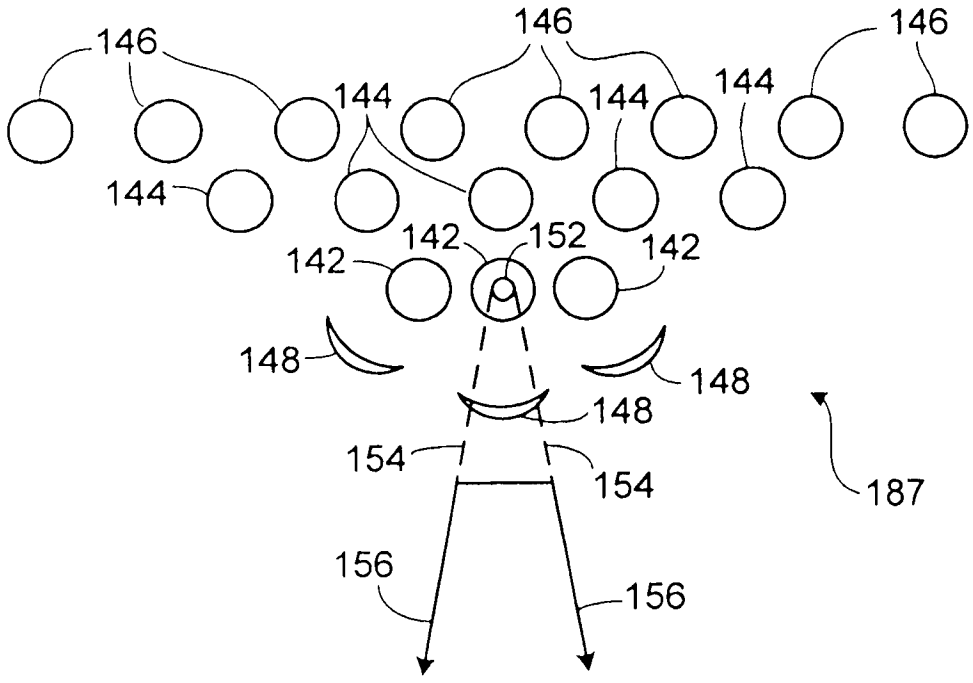

146
146
146
144
144
144
144
142
142
142
152
148
148
148
148
154
154
156
156
187

圖4

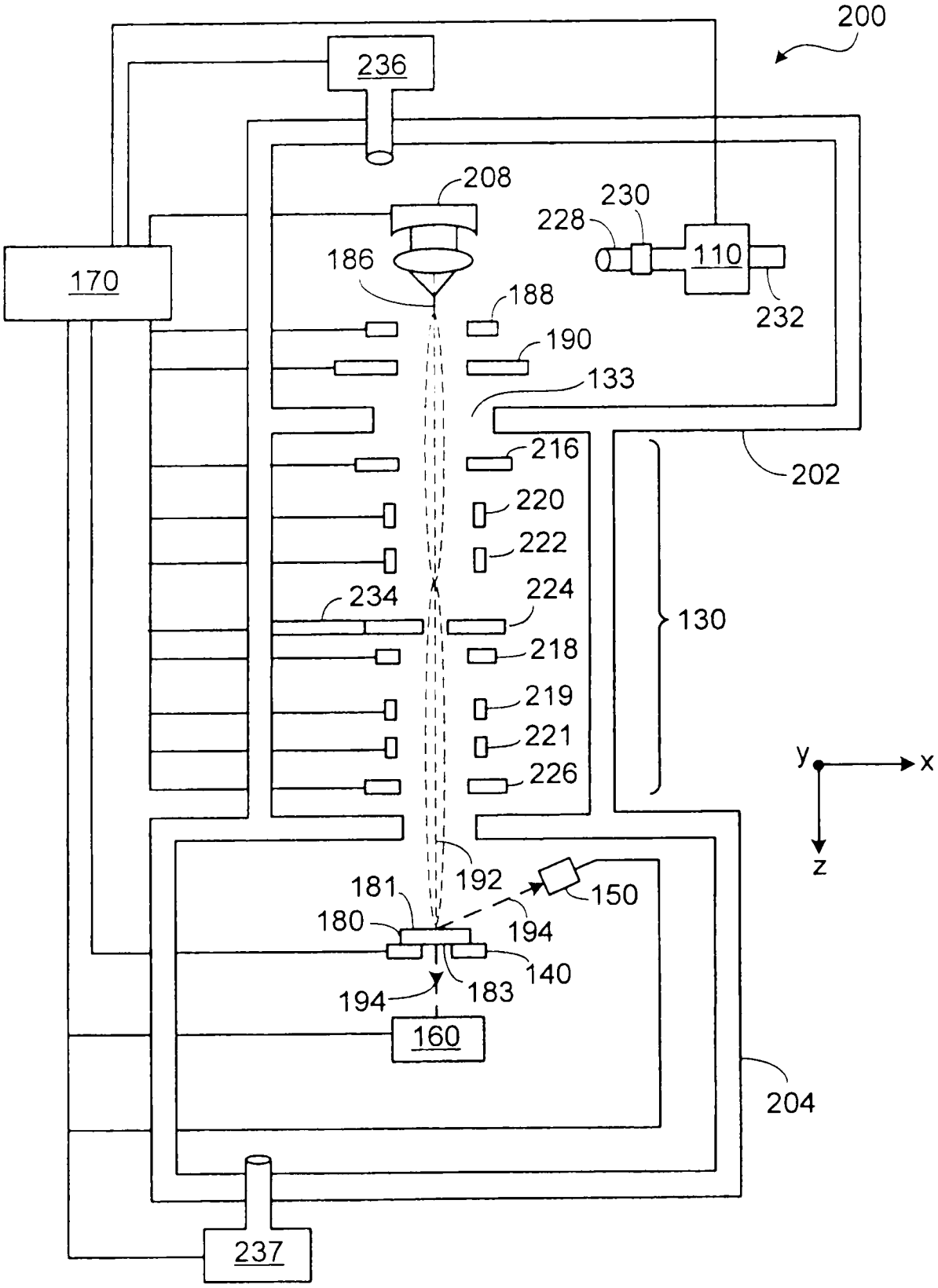

200
236
208
230
228
110
186
170
188
232
190
133
216
202
220
222
234
224
130
218
219
221
226
y
x
z
192
181
150
180
194
140
183
194
160
204
237

圖5

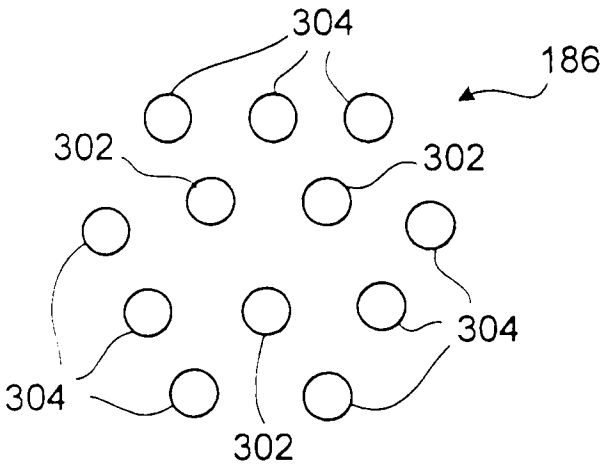

304
186
302
302
304
304
302

圖6

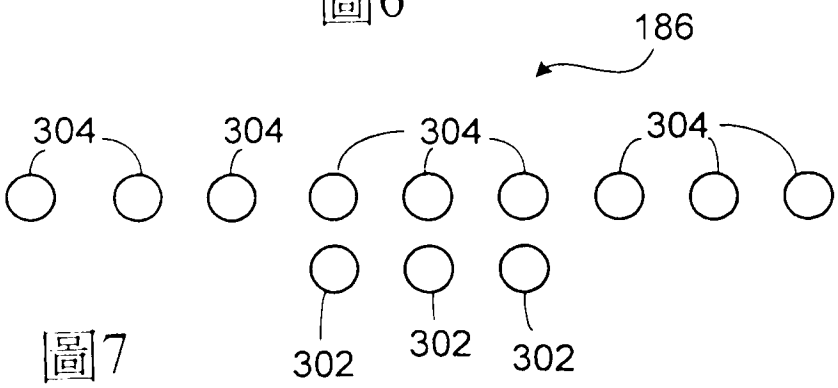

186
304
304
304
304
302
302
302

圖7

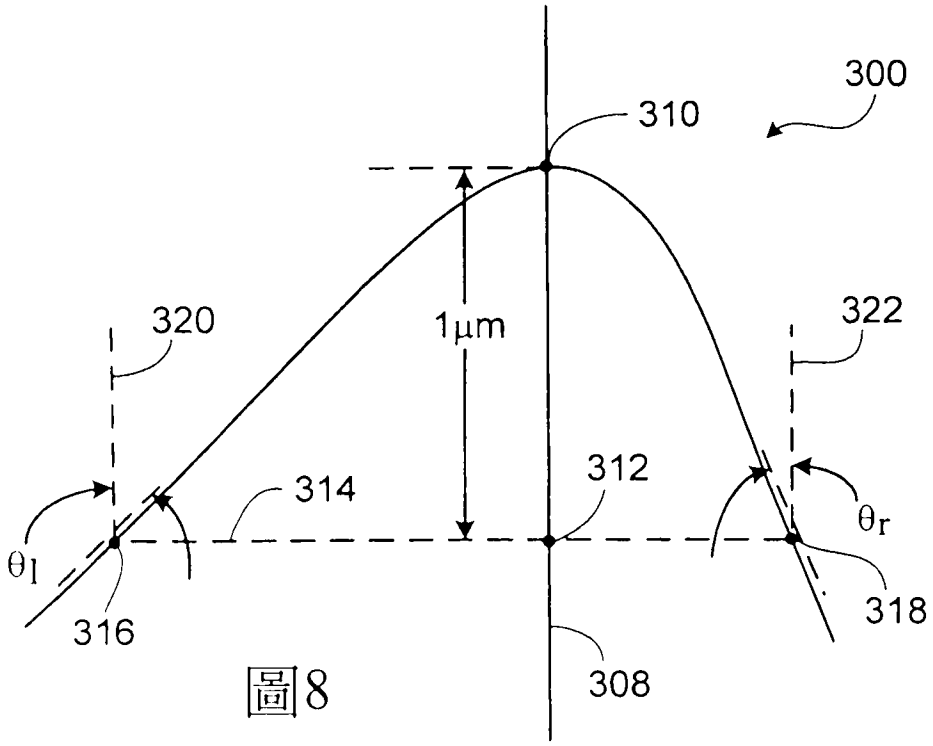

300
310
320
1μm
322
314
312
θr
θl
316
318
308

圖8

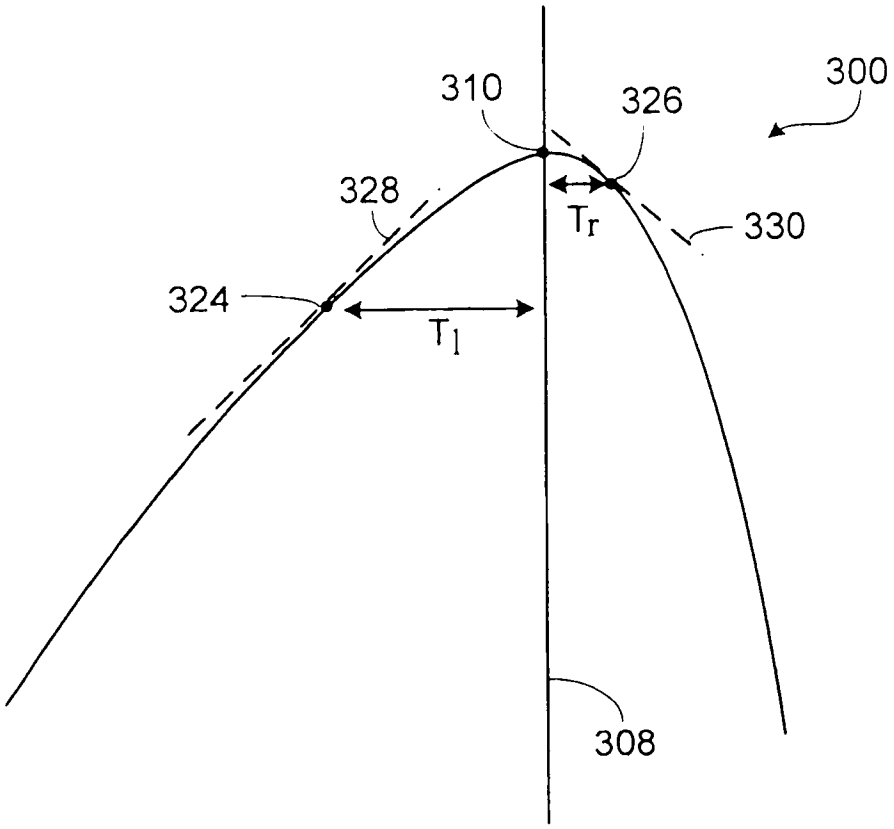


圖9

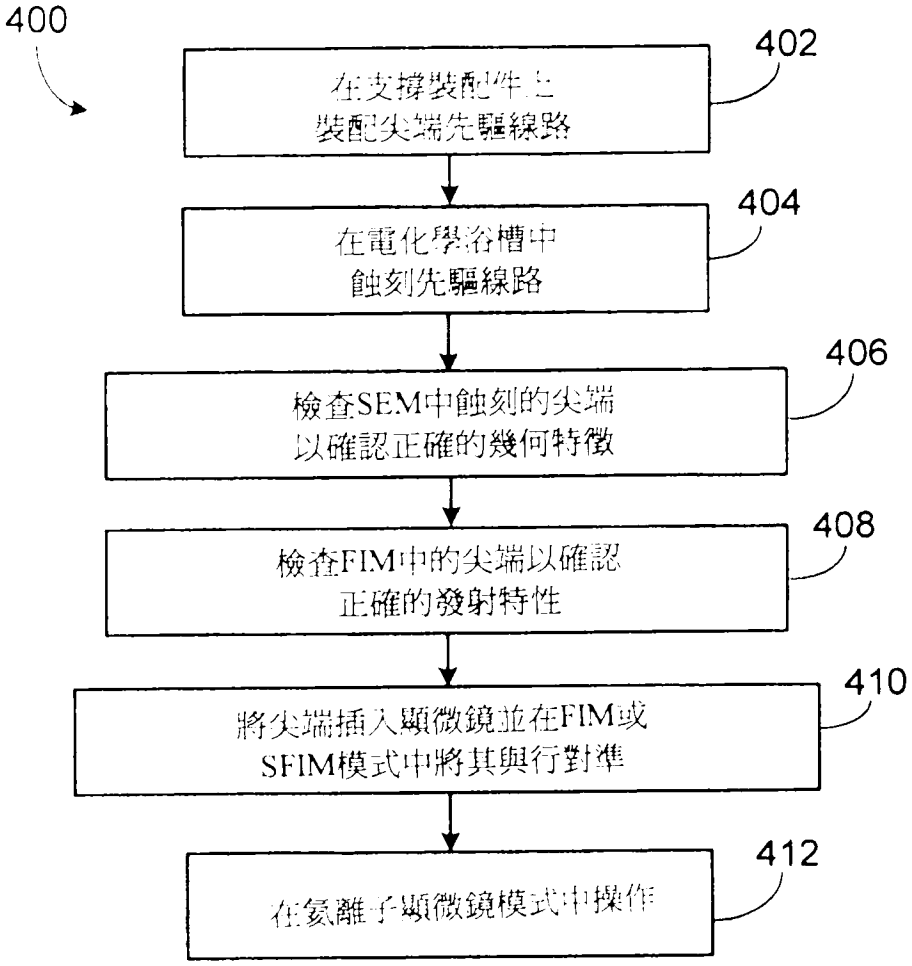

400
402
在支撐裝配件上
裝配尖端先驅線路
404
在電化學浴槽中
蝕刻先驅線路
406
檢查SEM中蝕刻的尖端
以確認正確的幾何特徵
408
檢查FIM中的尖端以確認
正確的發射特性
410
將尖端插入顯微鏡並在FIM或
SFIM模式中將其與行對準
412
在氦離子顯微鏡模式中操作

圖10

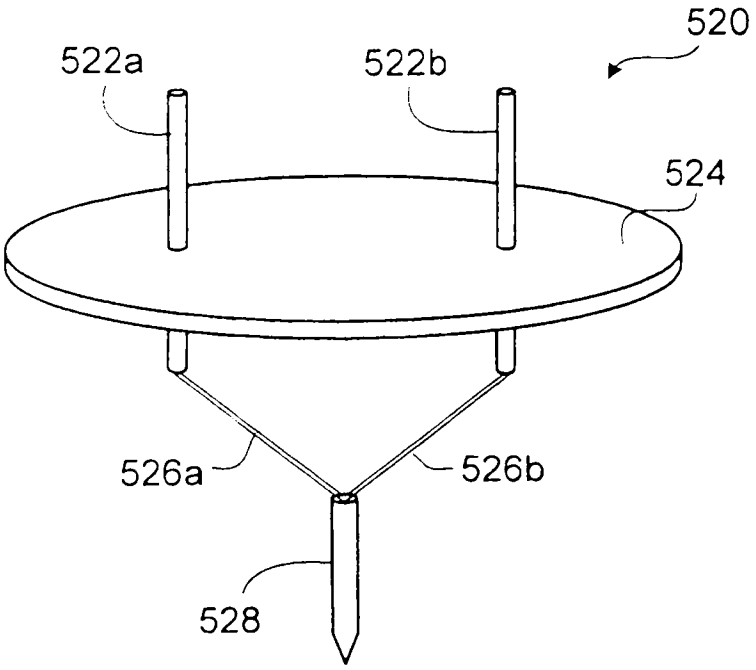

520
522a
522b
524
526a
526b
528

圖11A

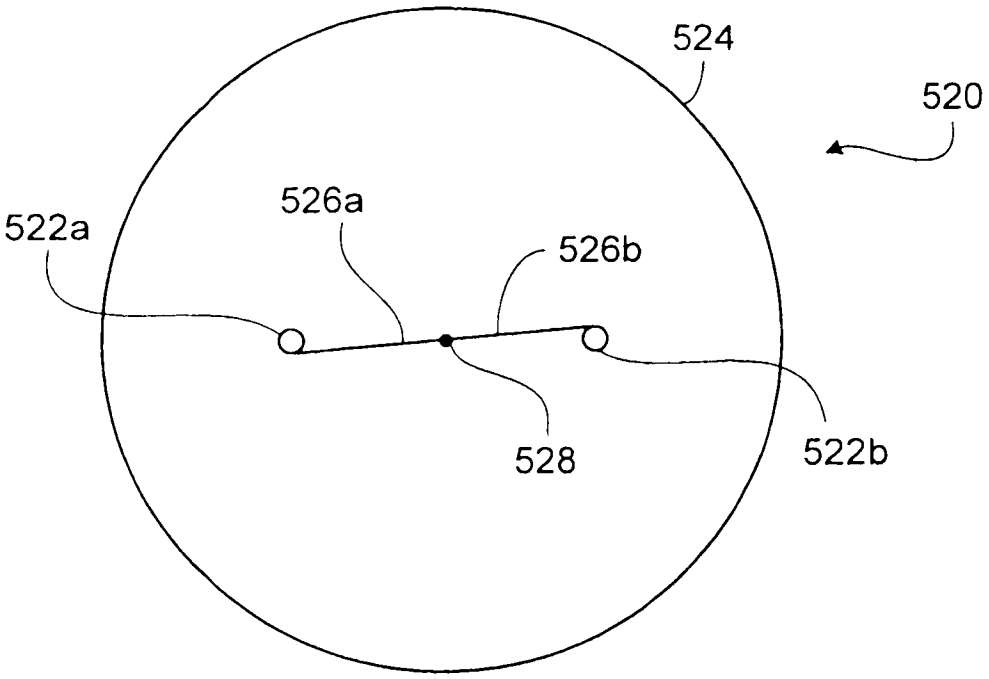

524
520
526a
522a
526b
528
522b

圖11B

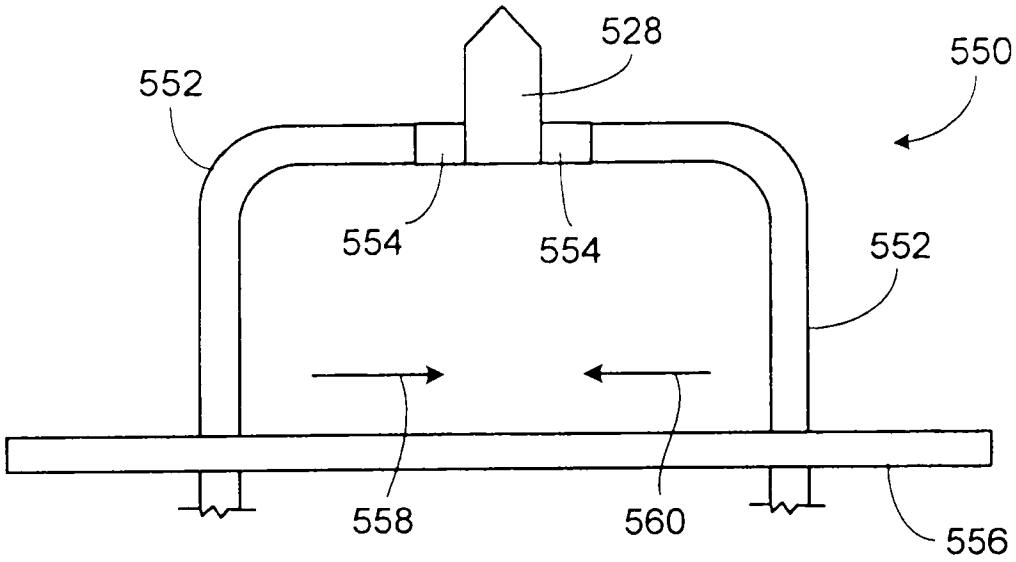


圖12

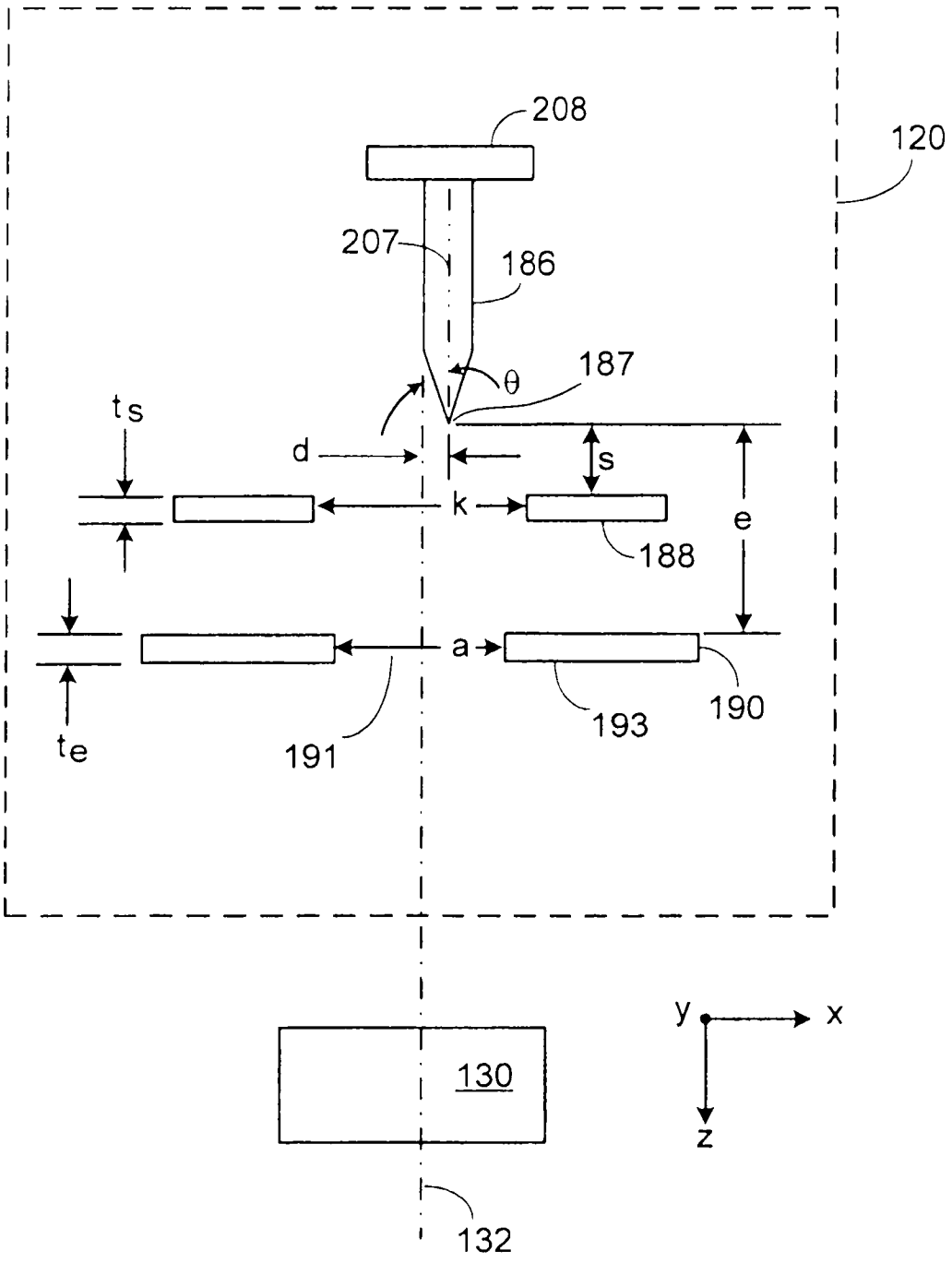


圖13

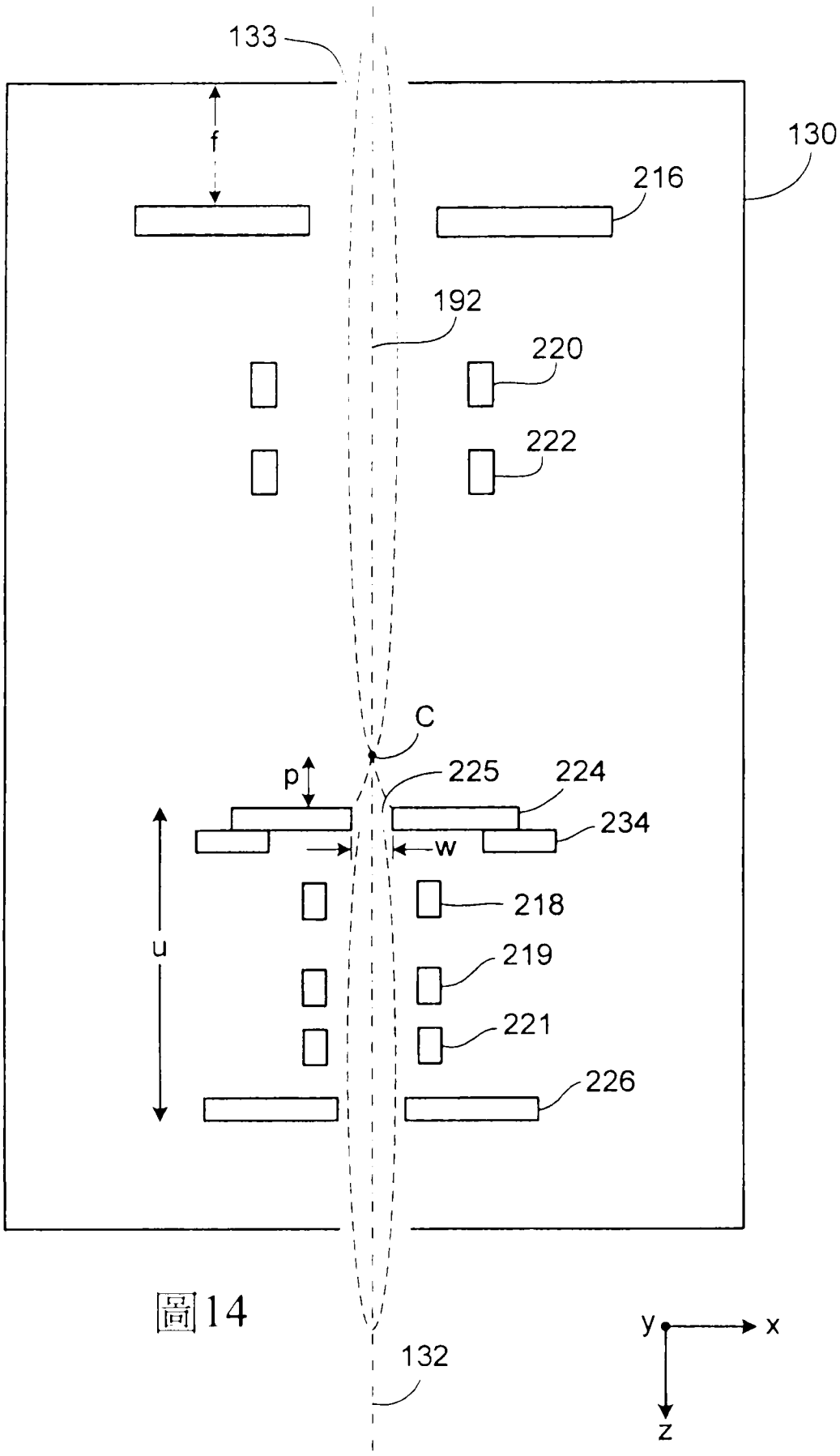

133
f
130
216
192
220
222
C
p
225
224
234
w
218
u
219
221
226
132
y
x
z

圖14

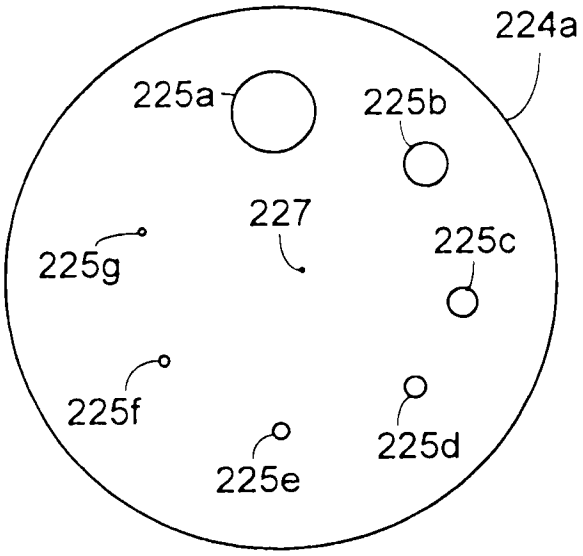

224a
225a
225b
227
225c
225g
225f
225d
225e

圖15

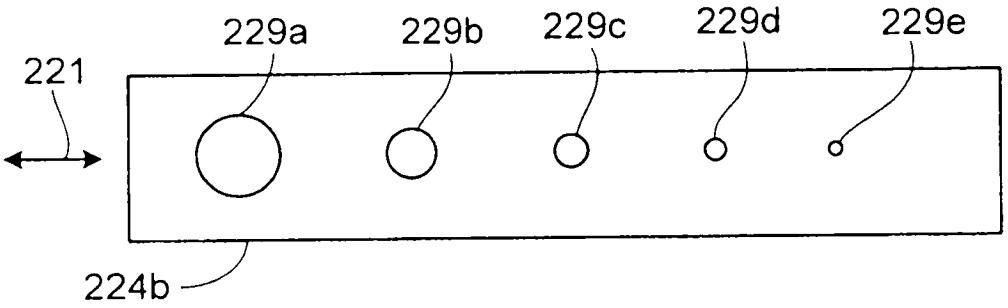

229a
229b
229c
229d
229e
221
224b

圖16

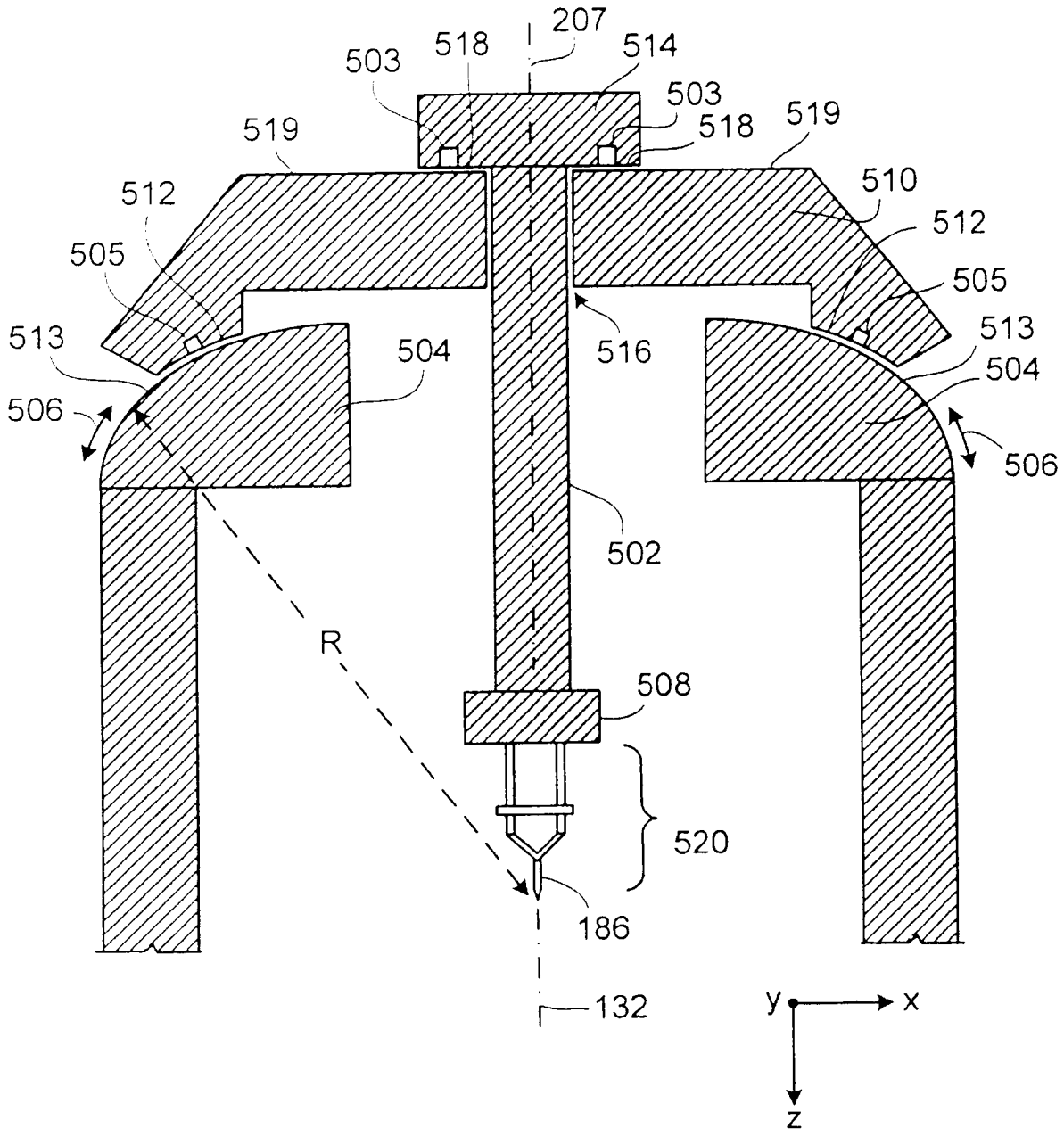

207
503
518
514
503
518
519
519
512
510
512
505
505
513
513
504
516
504
506
506
502
R
508
520
186
132
y
x
z

圖17

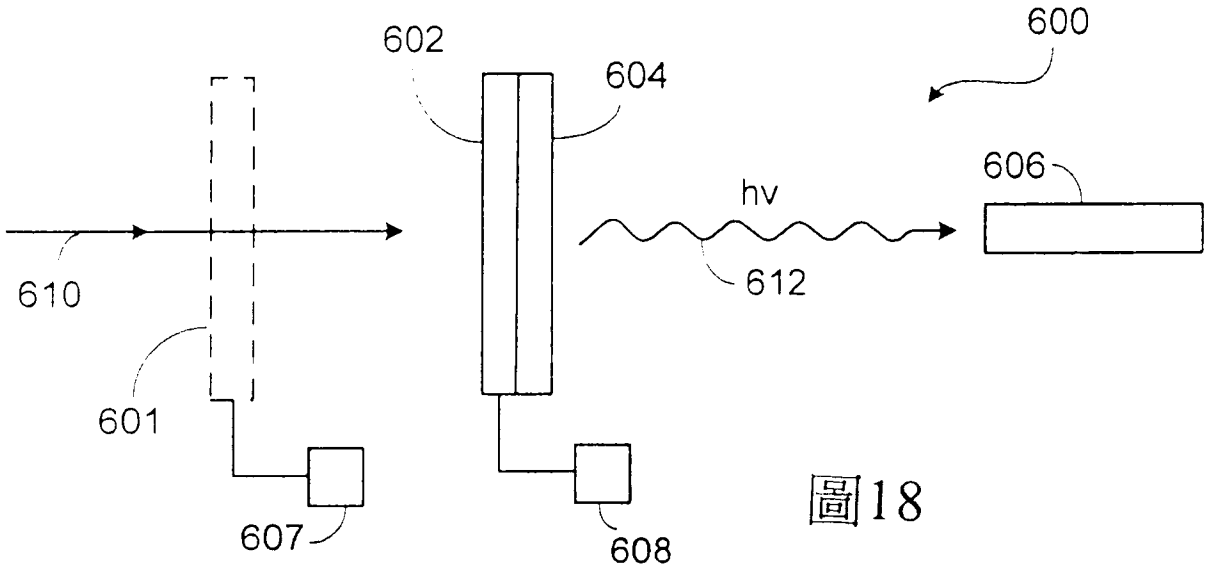

602
604
600
606
hv
610
612
601
607
608

圖18

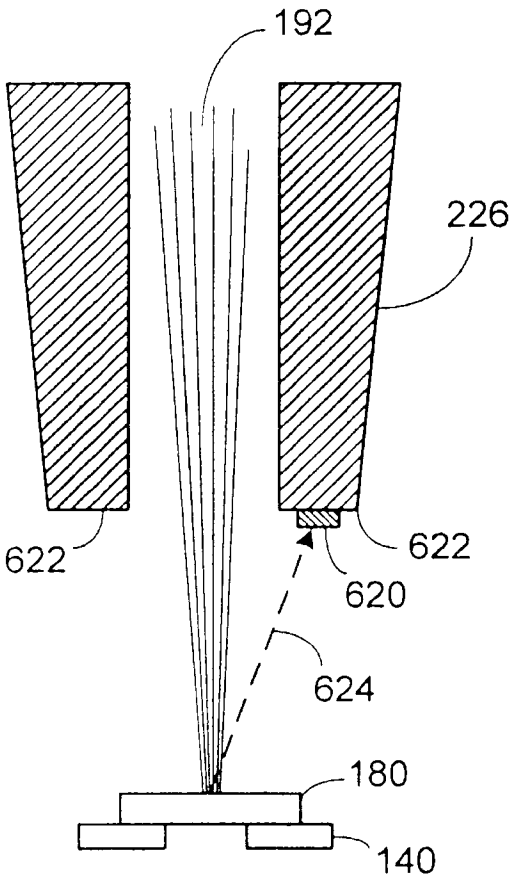

192
226
622
622
620
624
180
140

圖19

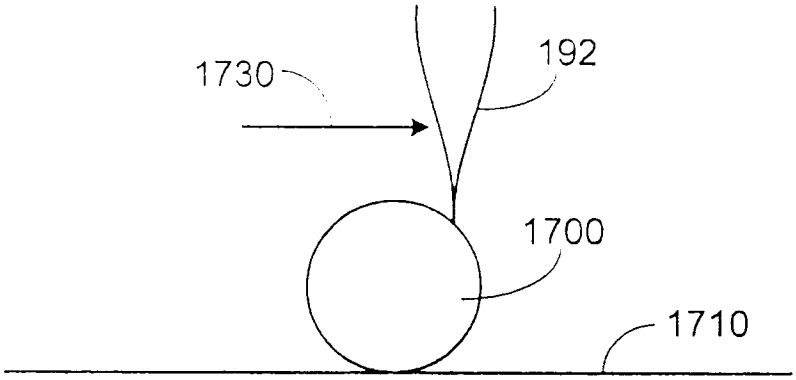


圖20A

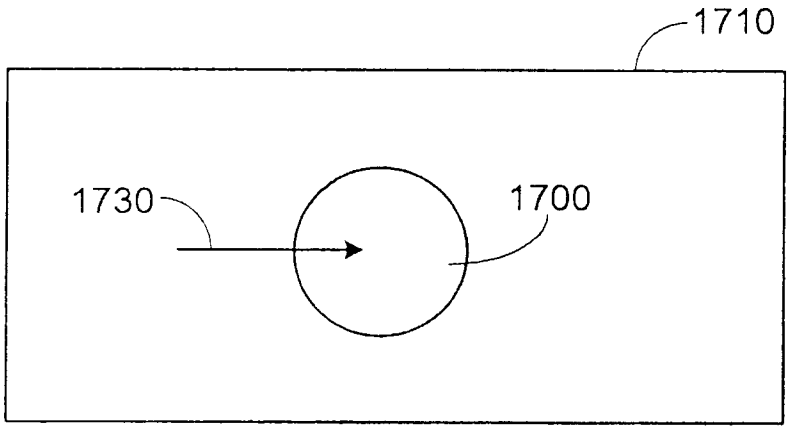


圖20B

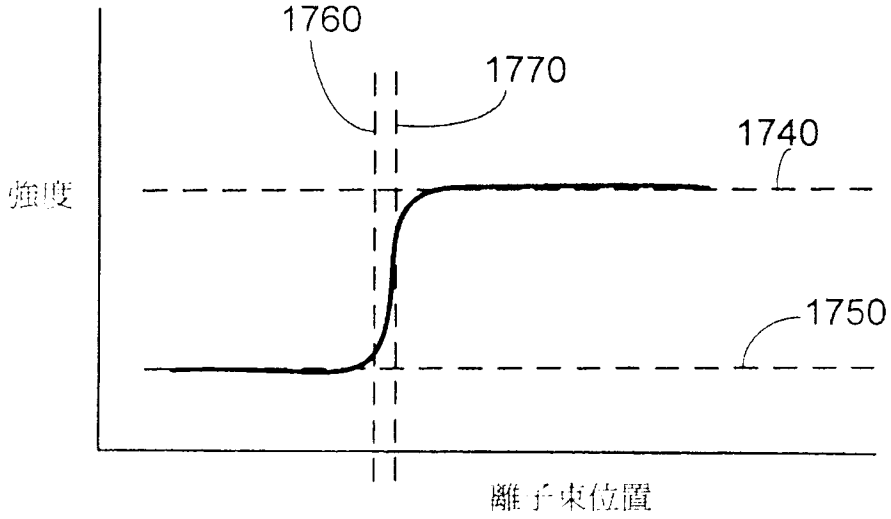


圖20C

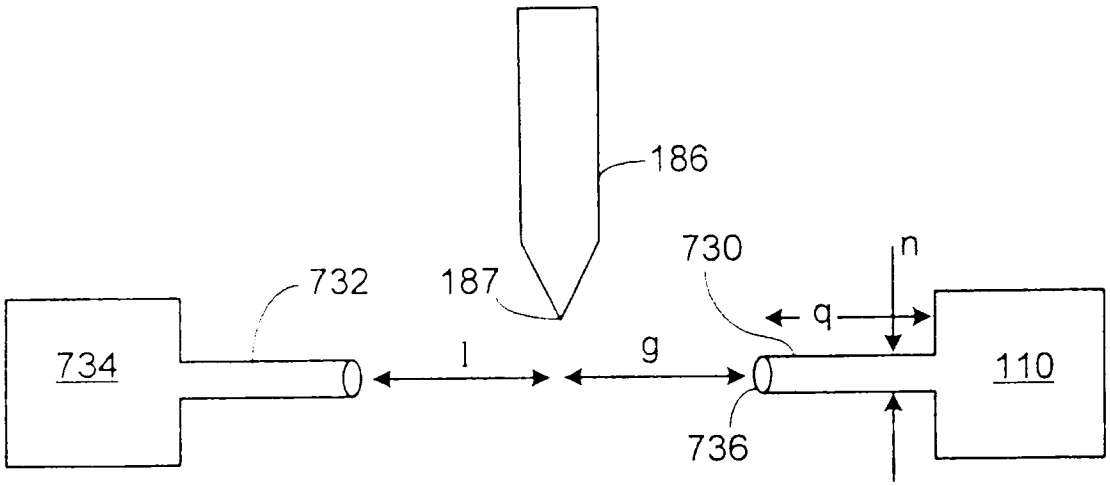

186
187
732
730
n
q
734
l
g
110
736

圖21

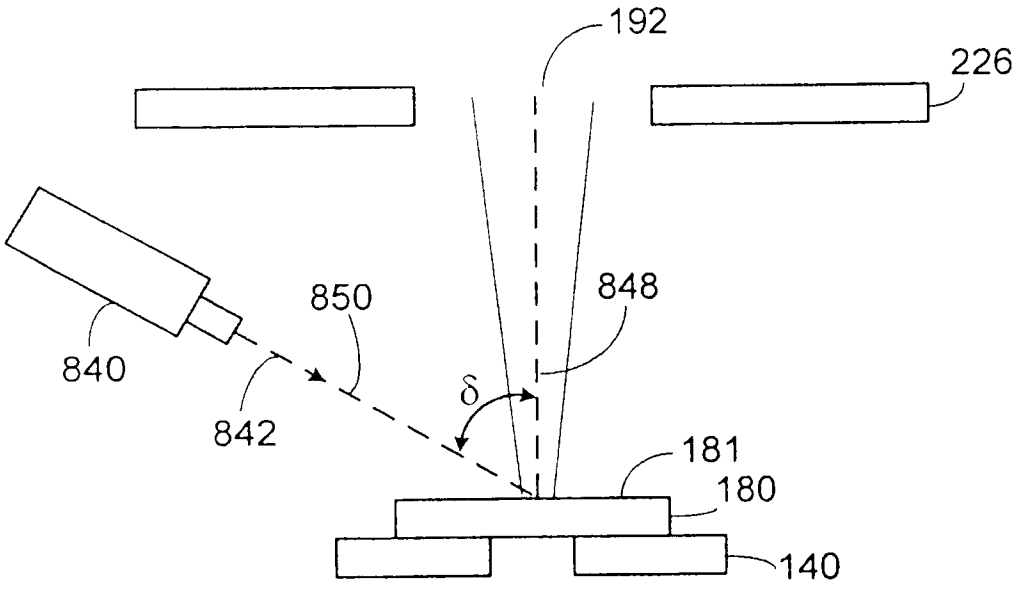

192
226
850
848
840
δ
842
181
180
140

圖22

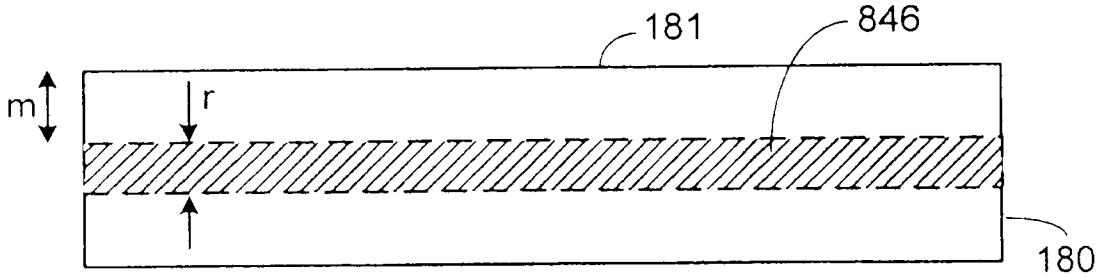

181
846
m
r
180

圖23

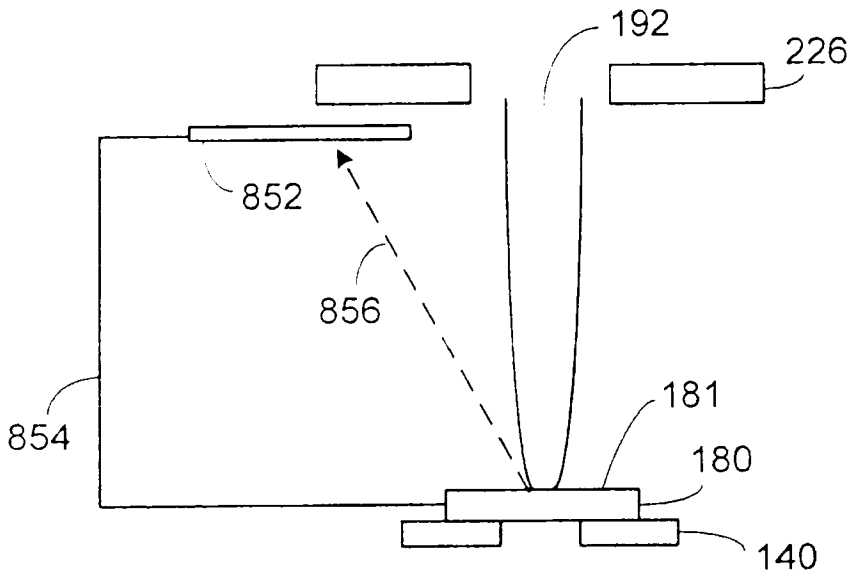

192
226
852
856
854
181
180
140

圖24

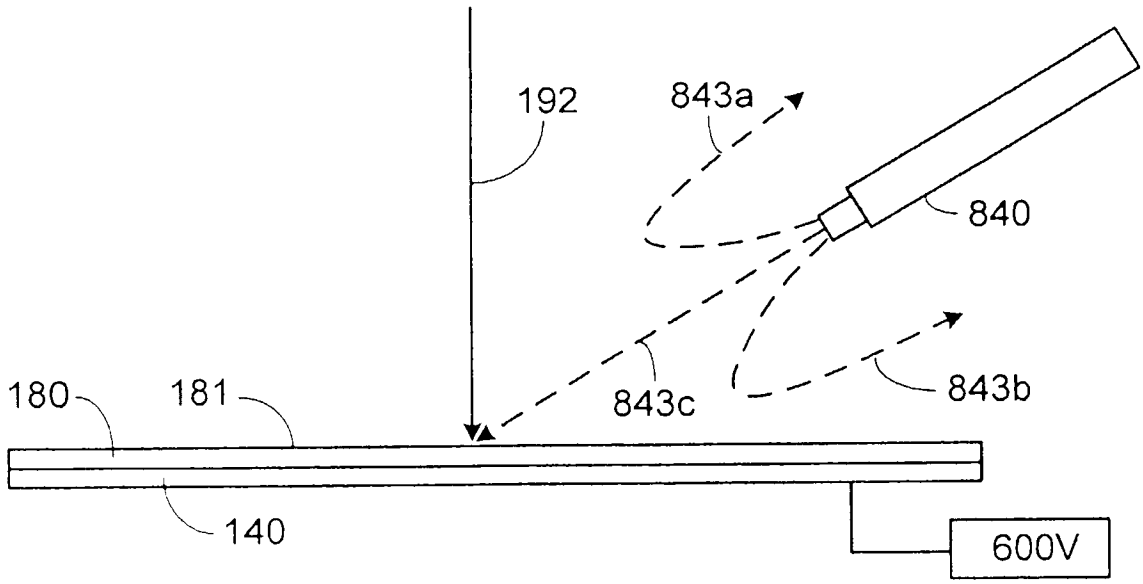

192
843a
840
180
181
843c
843b
140
600V

圖25

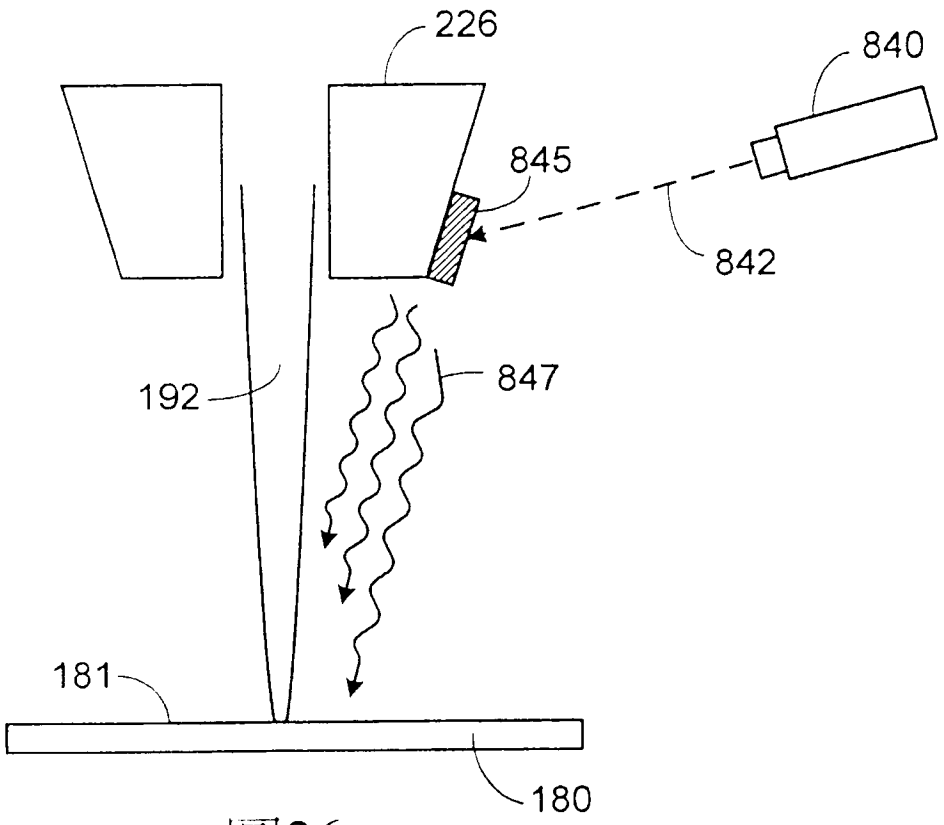


圖26

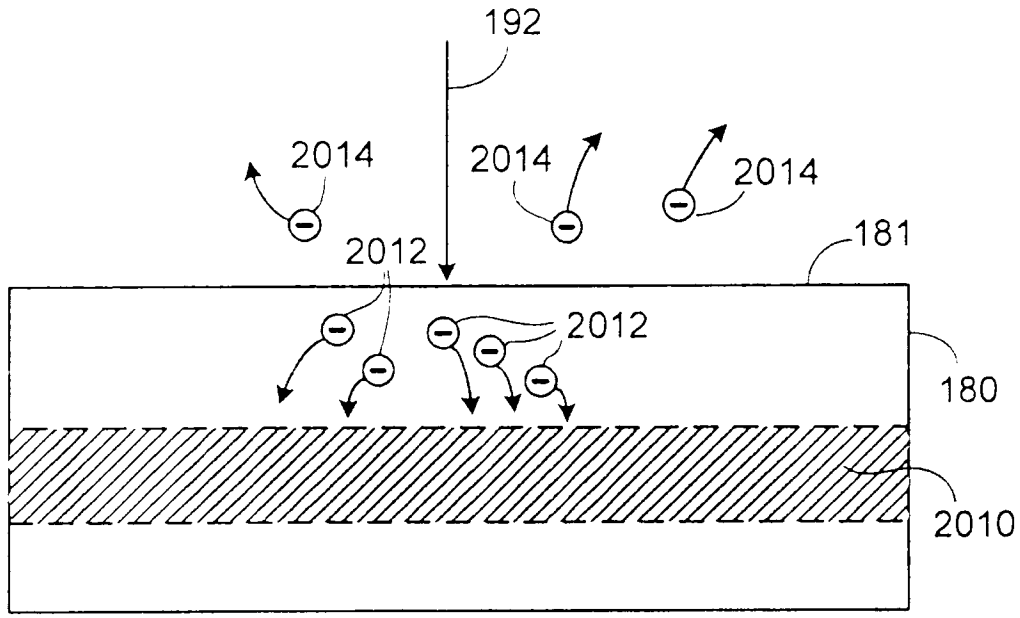

192
2014
2014
2014
2012
181
2012
180
2010

圖27A

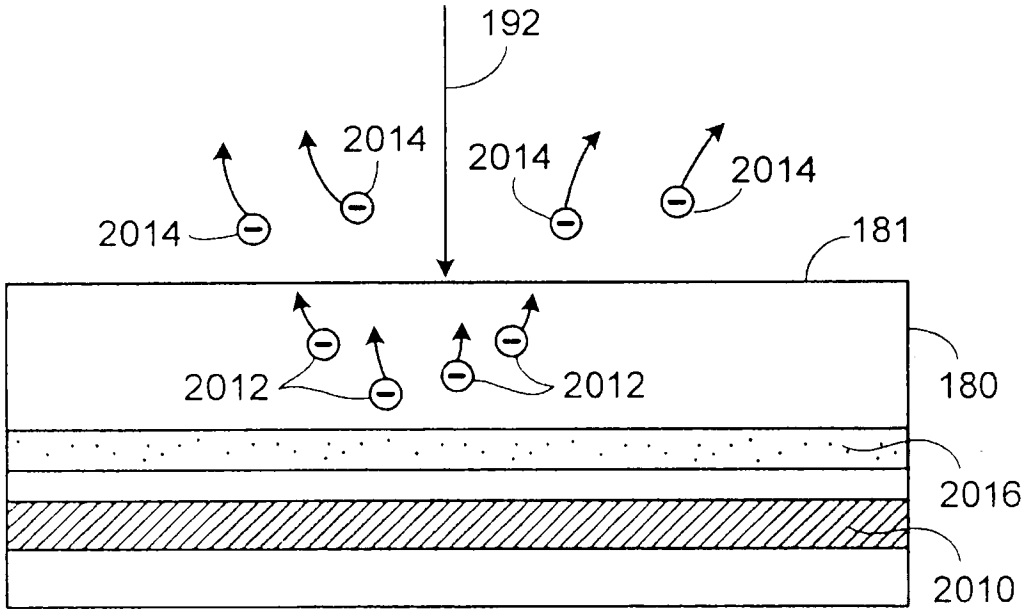

192
2014
2014
2014
2014
181
2012
2012
180
2016
2010

圖27B

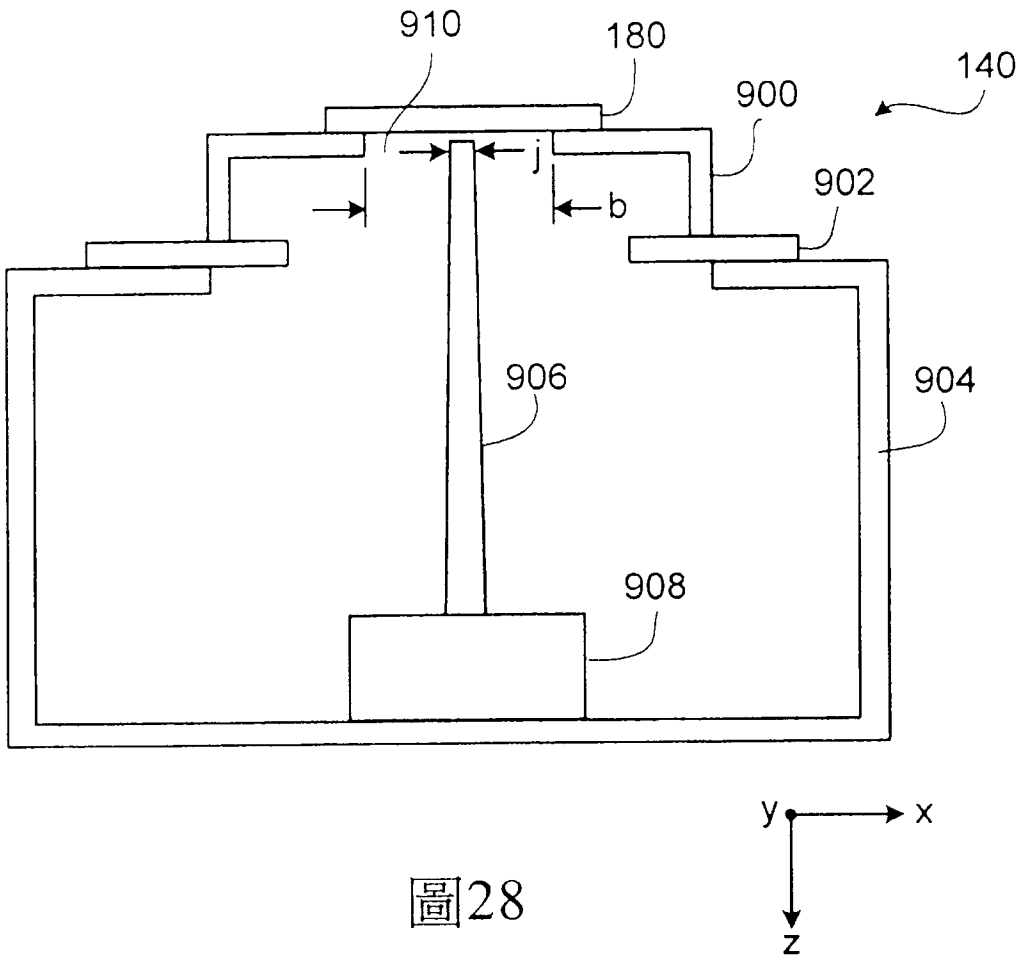


圖28

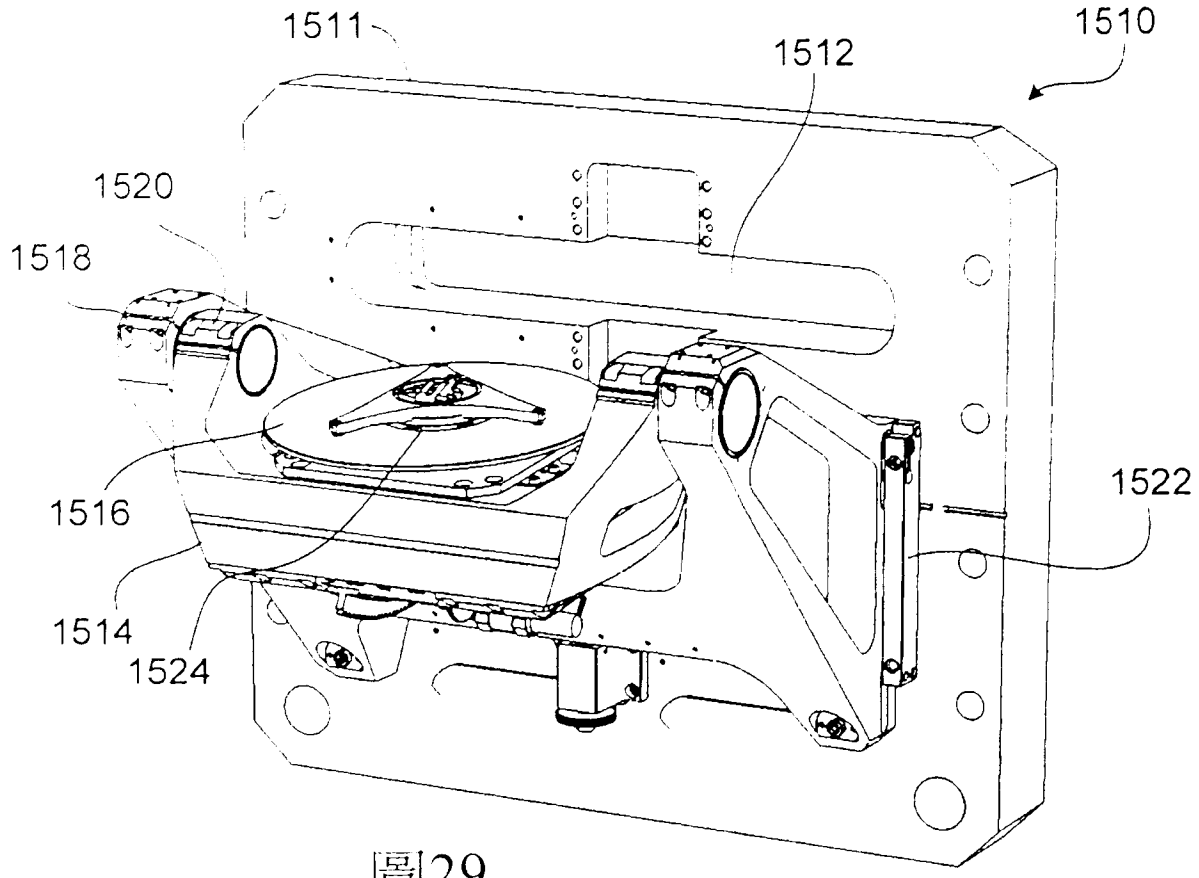

1511
1512
1510
1520
1518
1516
1522
1514
1524

圖29

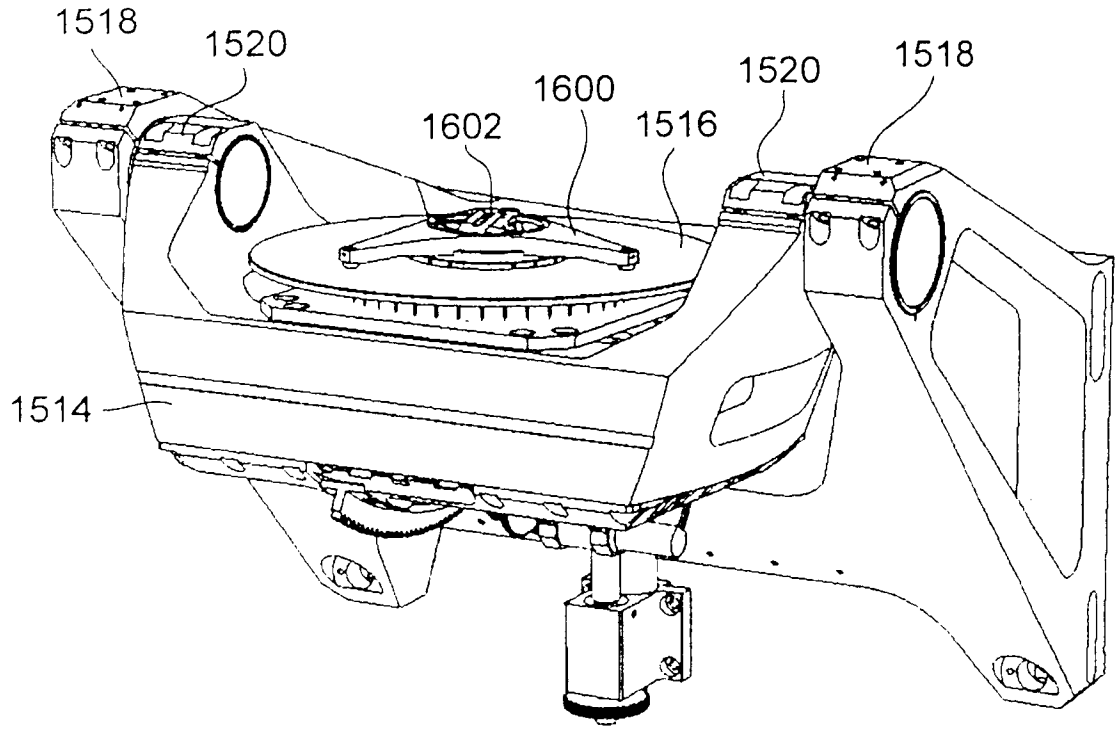

1518
1520
1600
1520
1518
1602
1516
1514

圖30

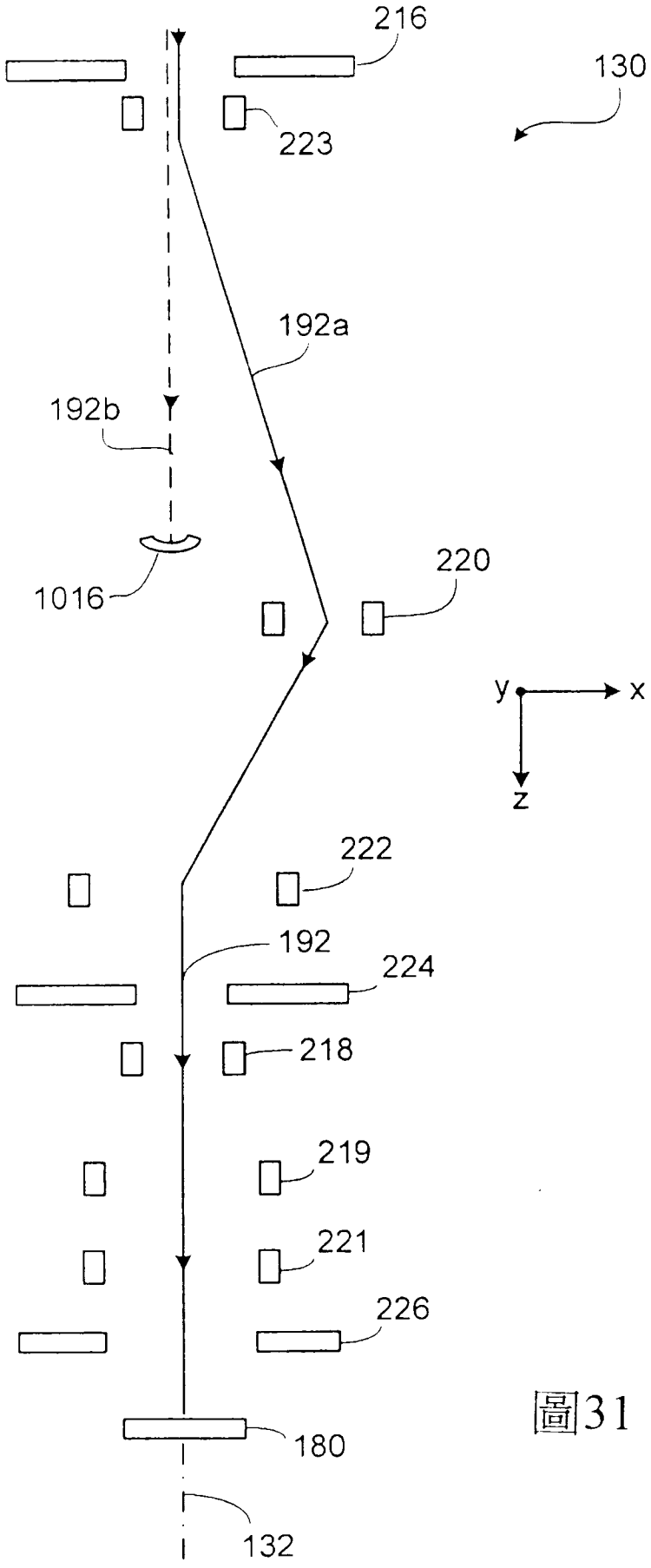

216
130
223
192a
192b
1016
220
y
x
z
222
192
224
218
219
221
226
180
132

圖31

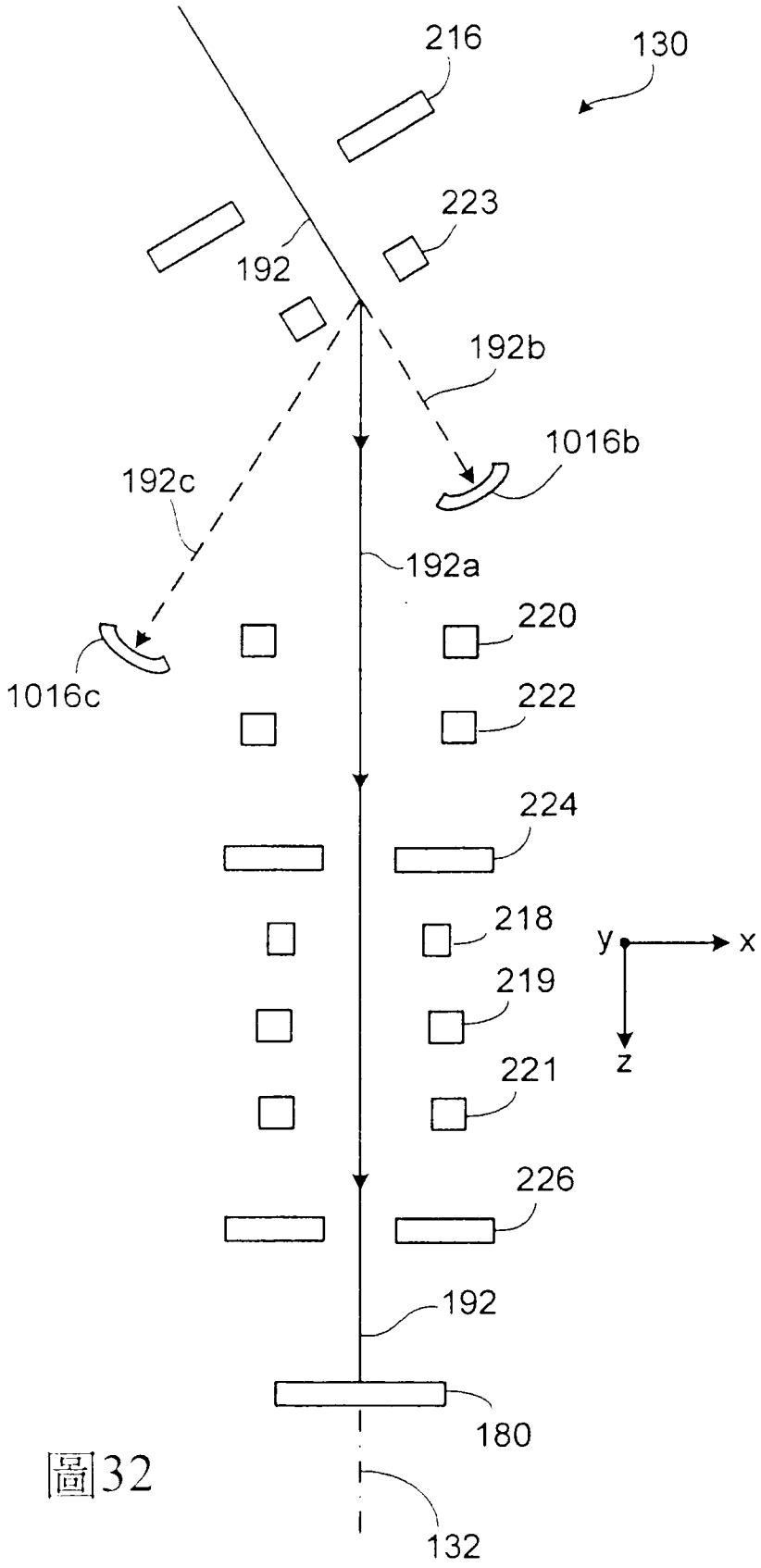

216
130
223
192
192b
1016b
192c
192a
220
1016c
222
224
218
y
x
219
z
221
226
192
180
132

圖32

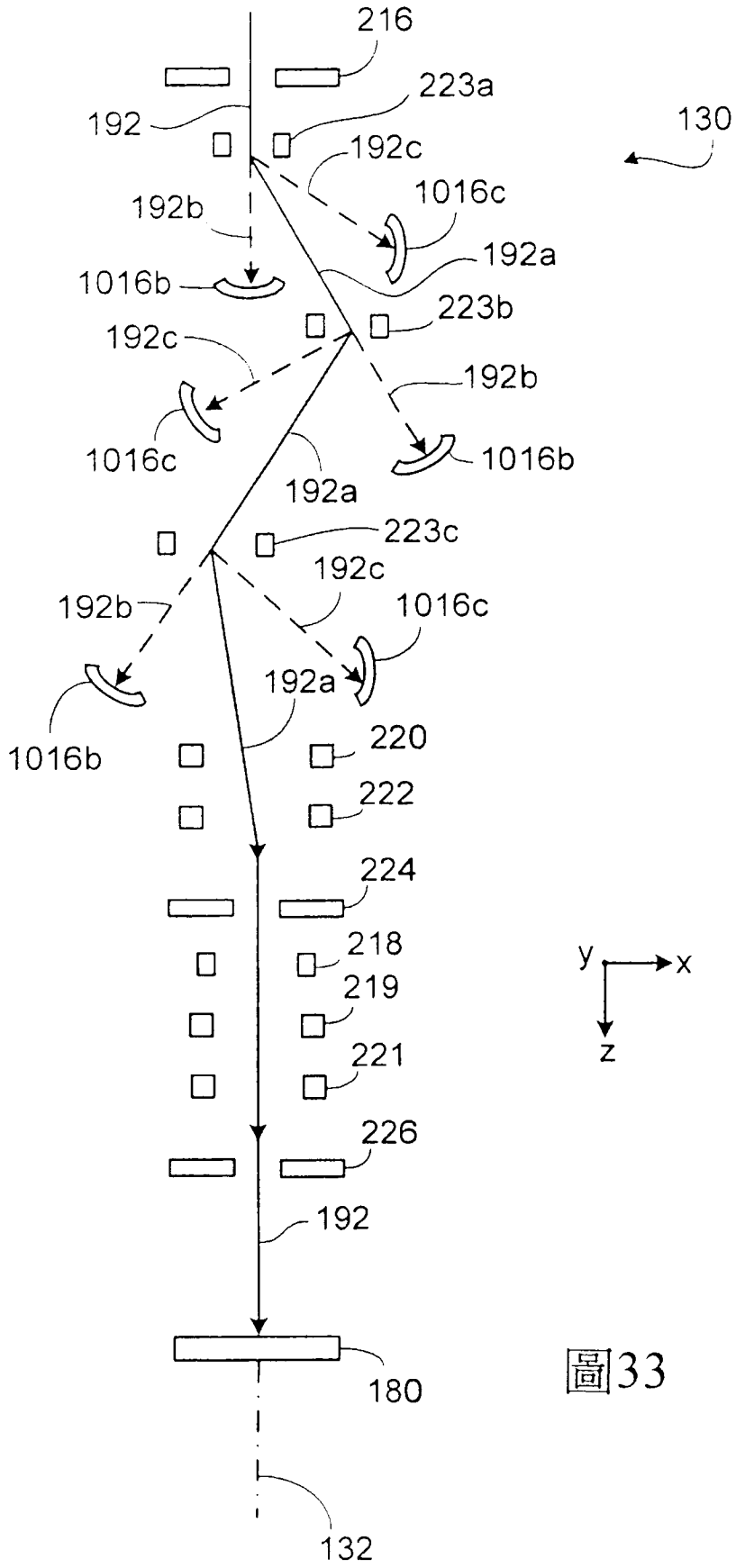

216
223a
192
130
192c
1016c
192b
192a
1016b
223b
192c
192b
1016c
1016b
192a
223c
192c
192b
1016c
192a
1016b
220
222
224
218
219
221
226
192
180
132
y
x
z

圖33

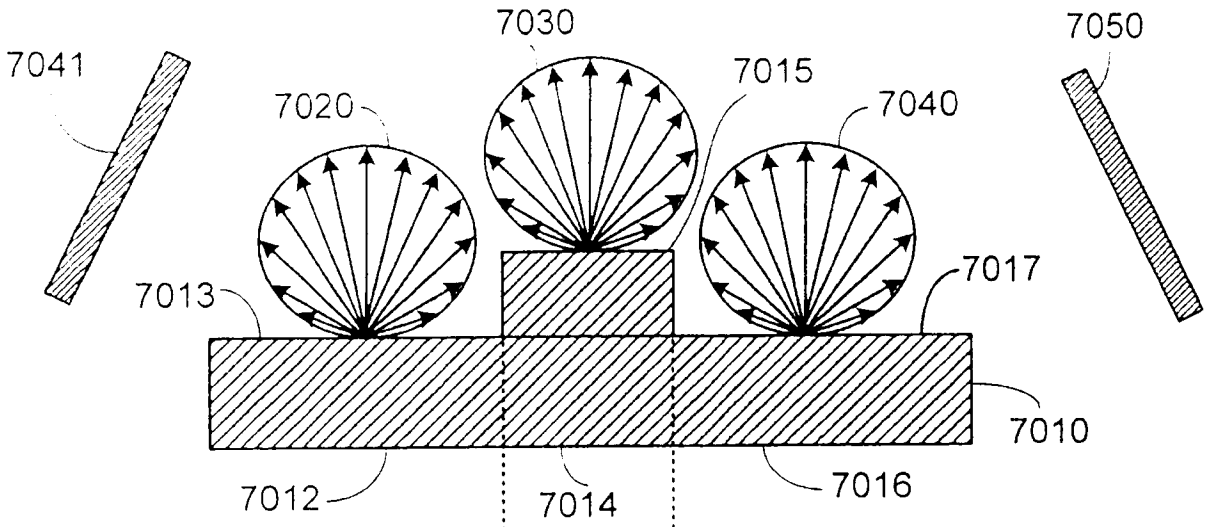

7030
7050
7041
7015
7020
7040
7017
7013
7010
7012
7014
7016

圖34A

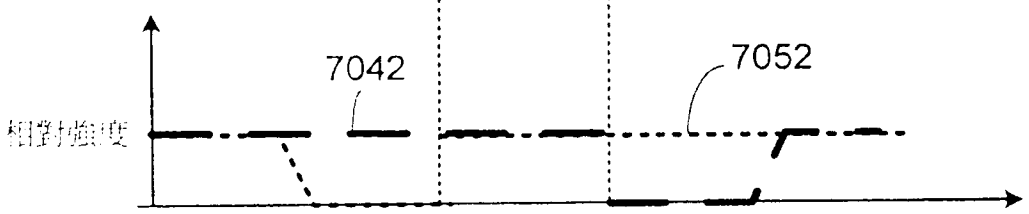

7042
7052
相對強度
表面位置

圖34B

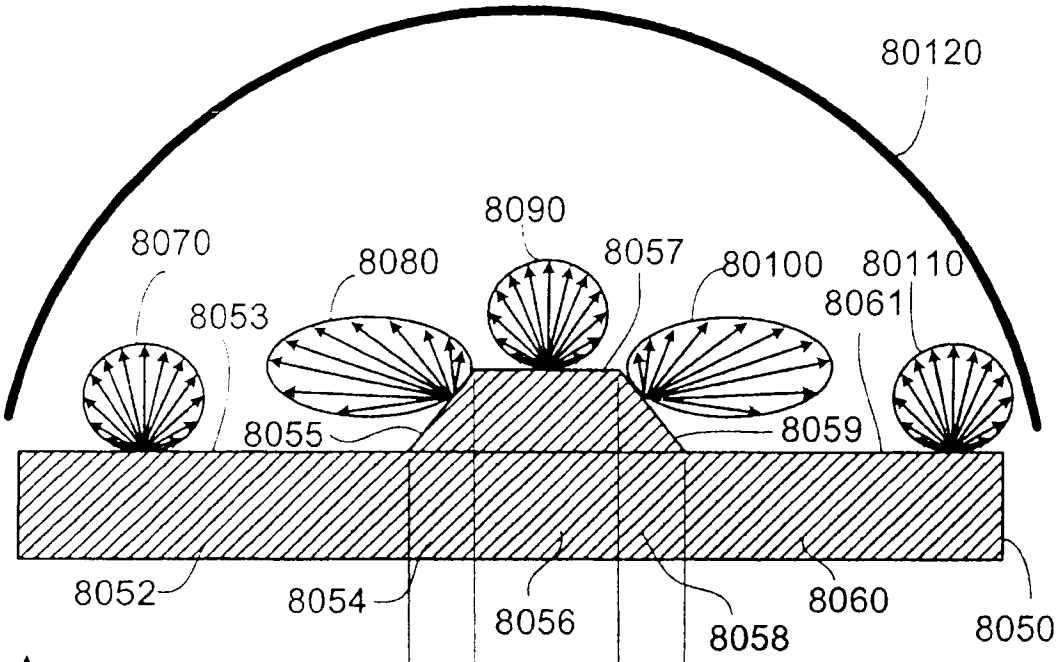


圖35A

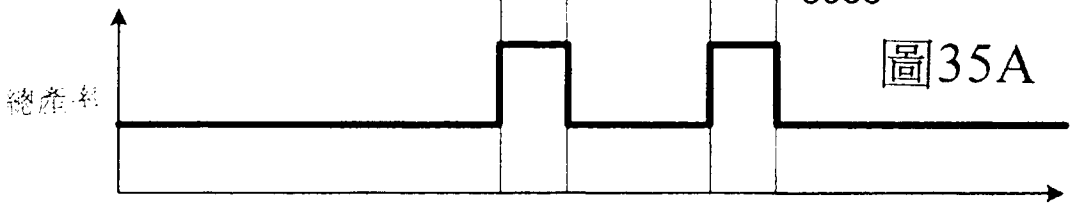


圖35B

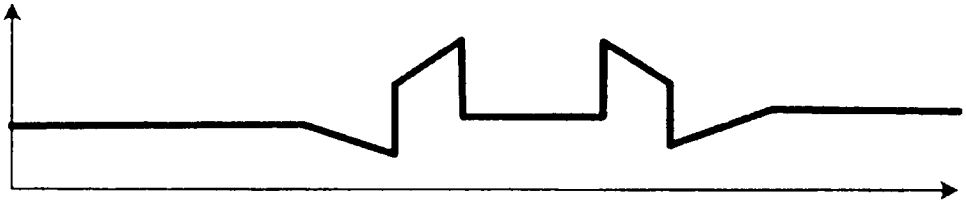


圖35C

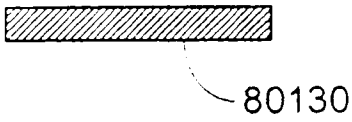


圖35D

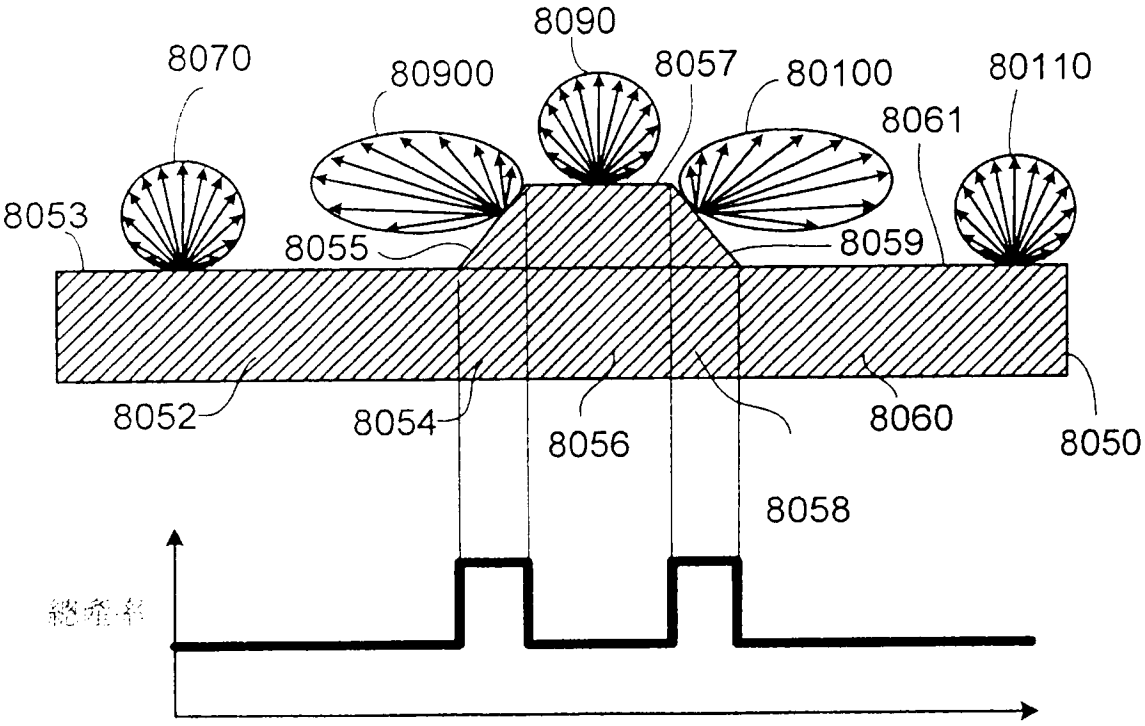


圖35E

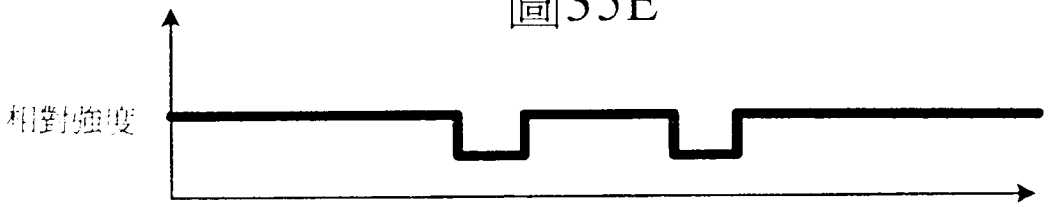
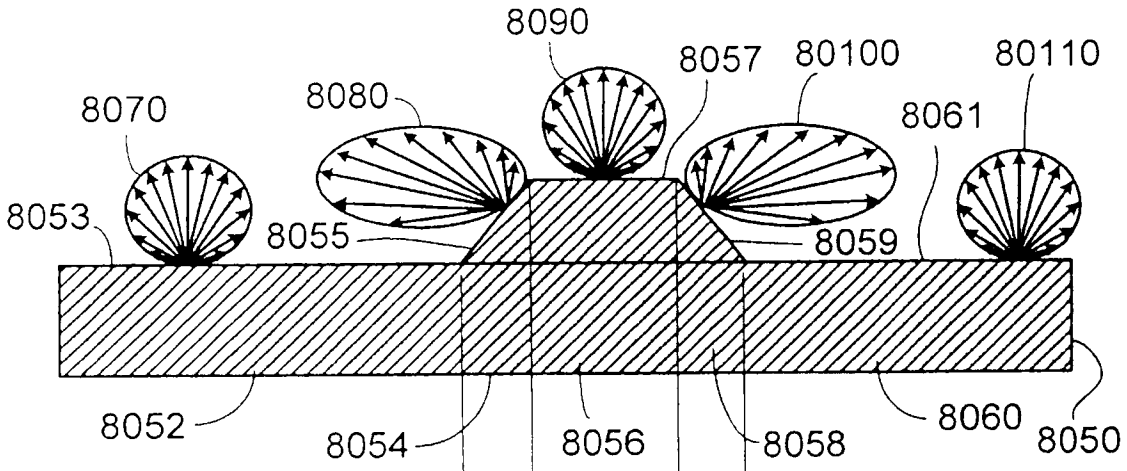


圖35F



圖35G



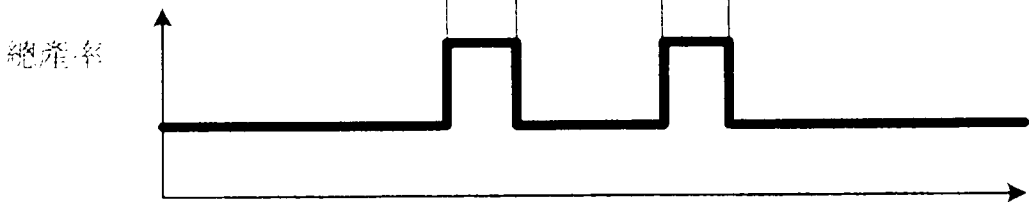


圖35H

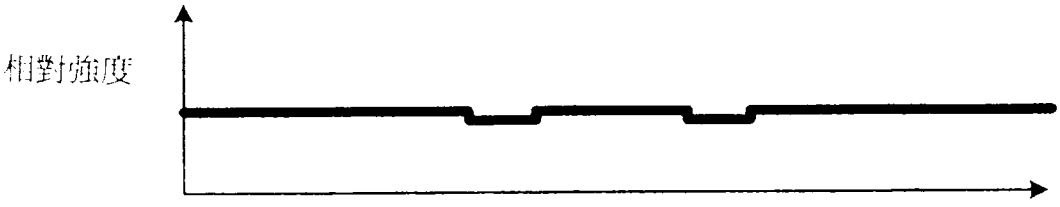


圖35I

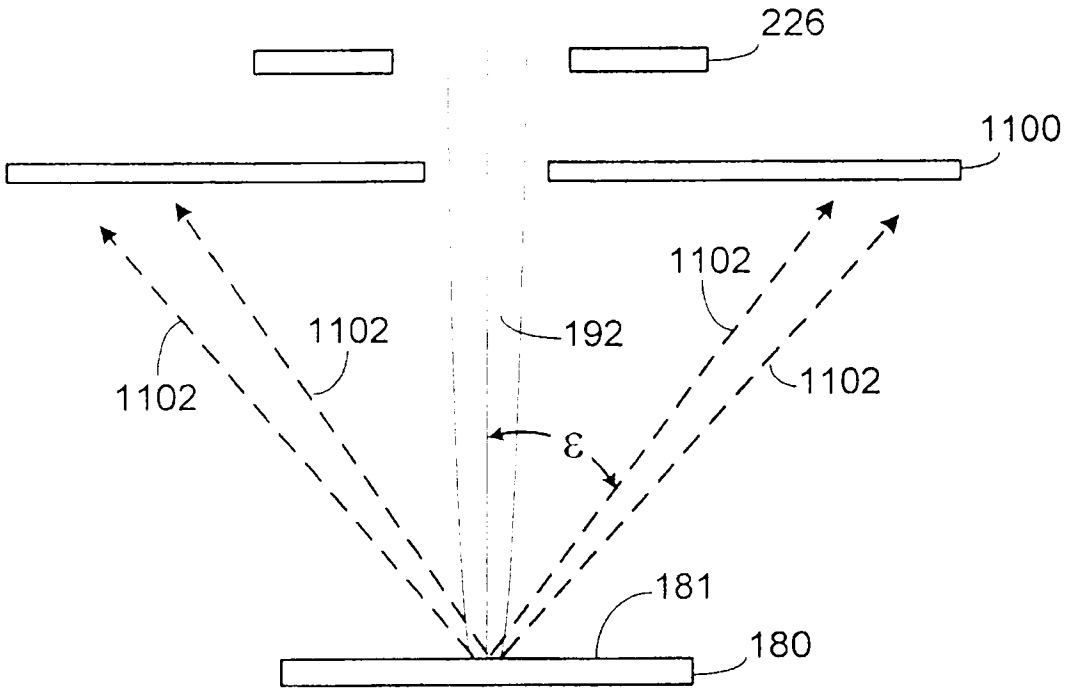


圖36

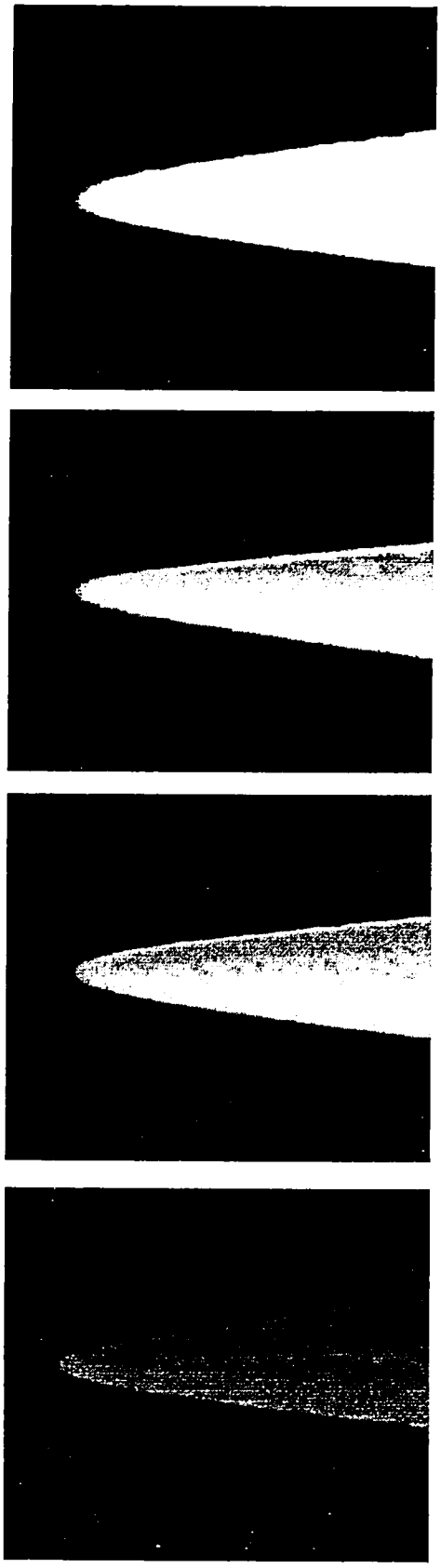


圖37A

圖37B

圖37C

圖37D

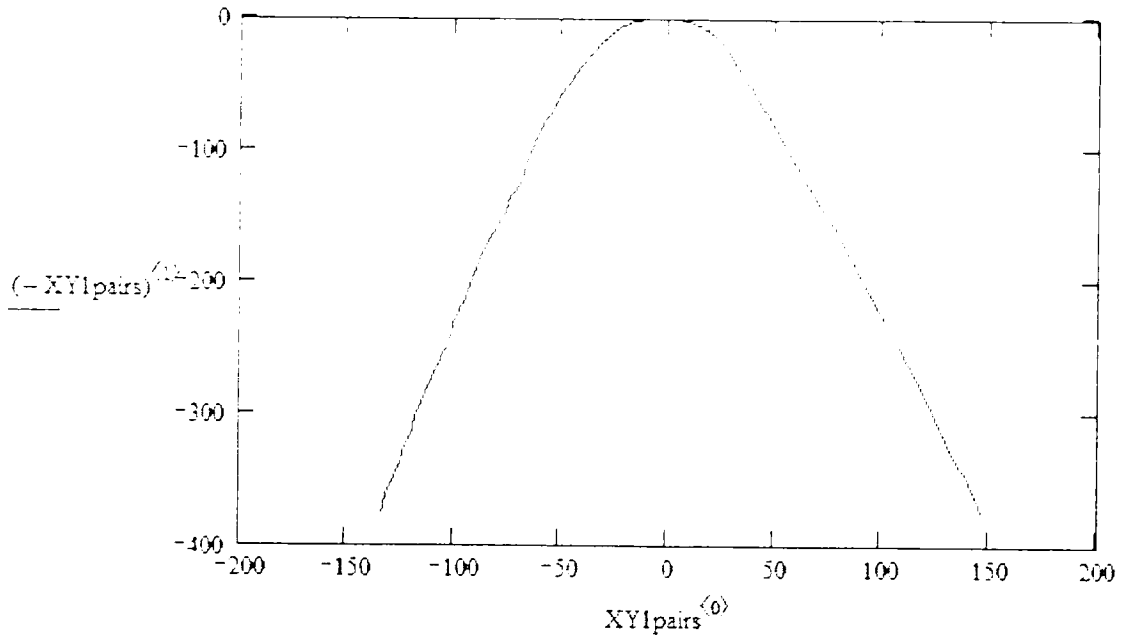

0
-100
-200
-300
-400
(−XY1pairs)⟨1⟩
-200
-150
-100
-50
0
50
100
150
200
XY1pairs⟨0⟩

圖38

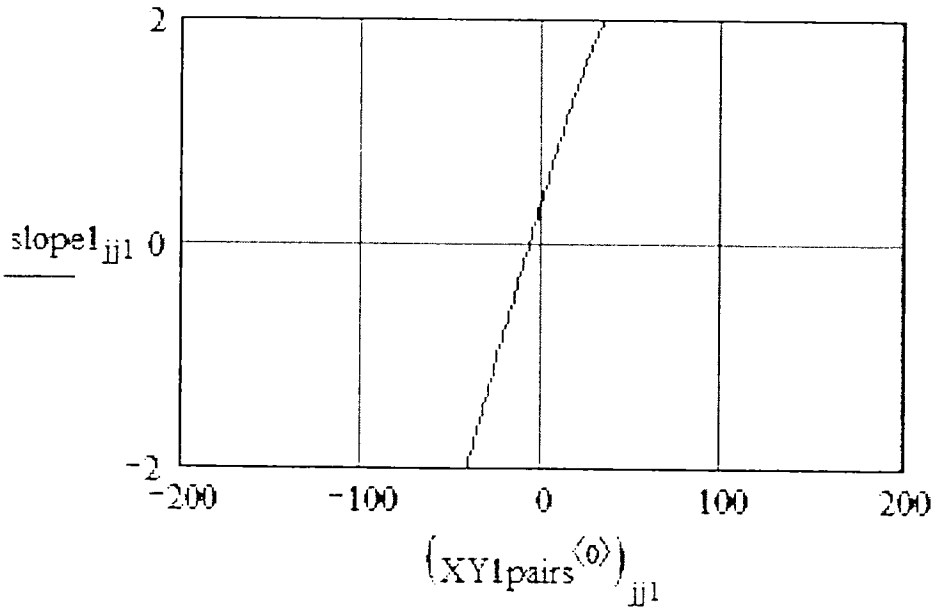

2
slope1jj1 0
-2
-200
-100
0
100
200
(XY1pairs⟨0⟩)jj1

圖39

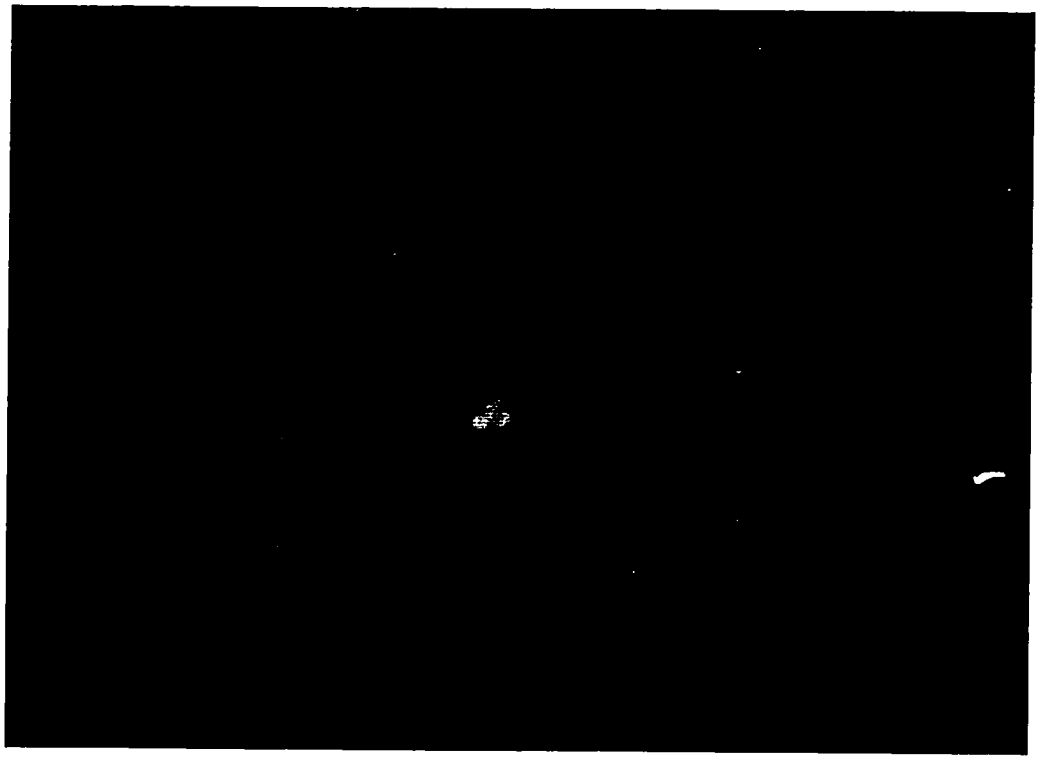


圖40

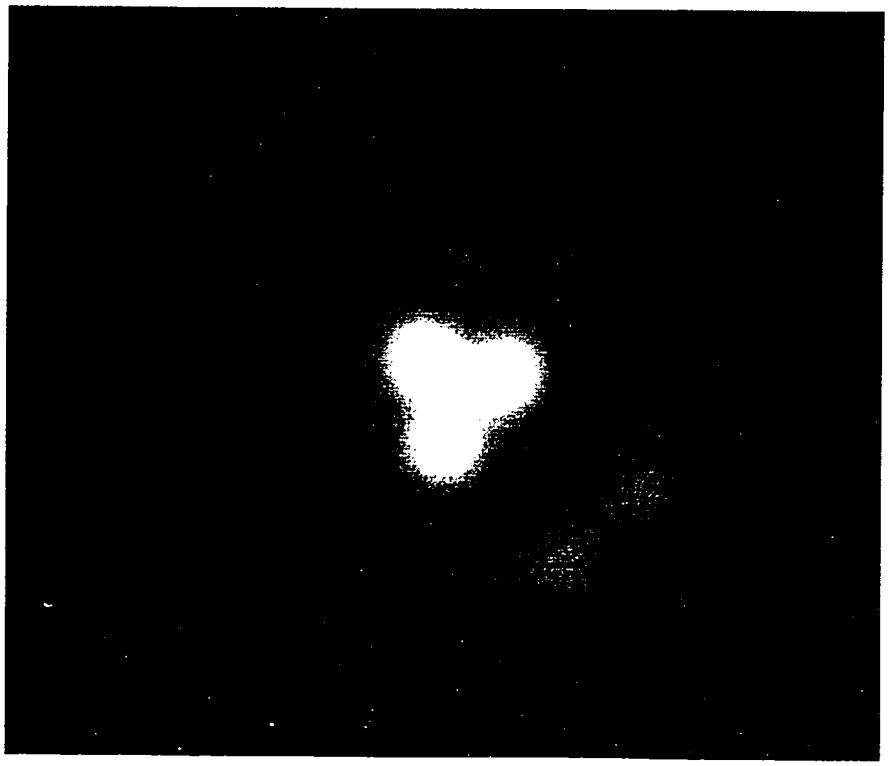


圖41

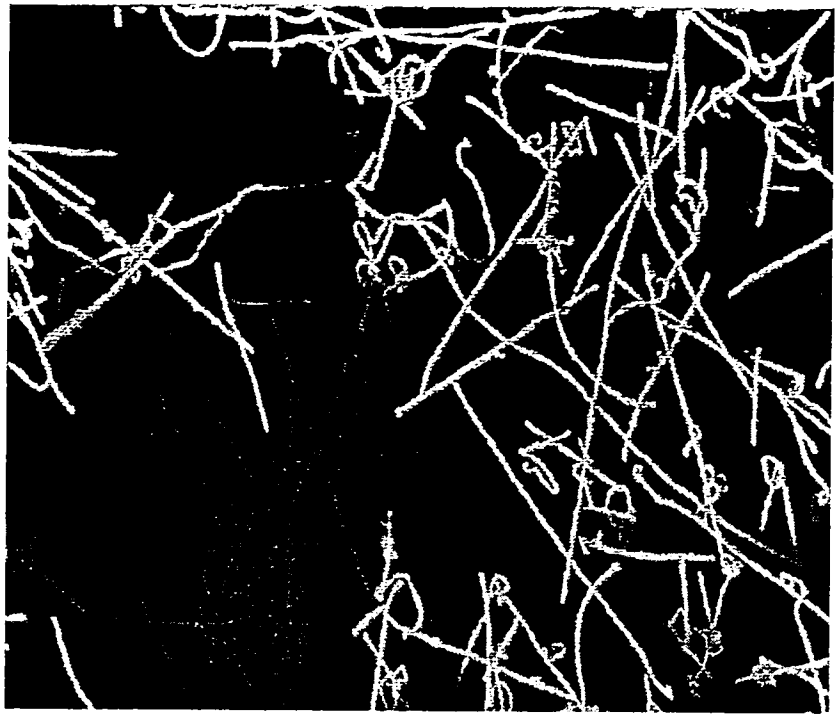


圖42

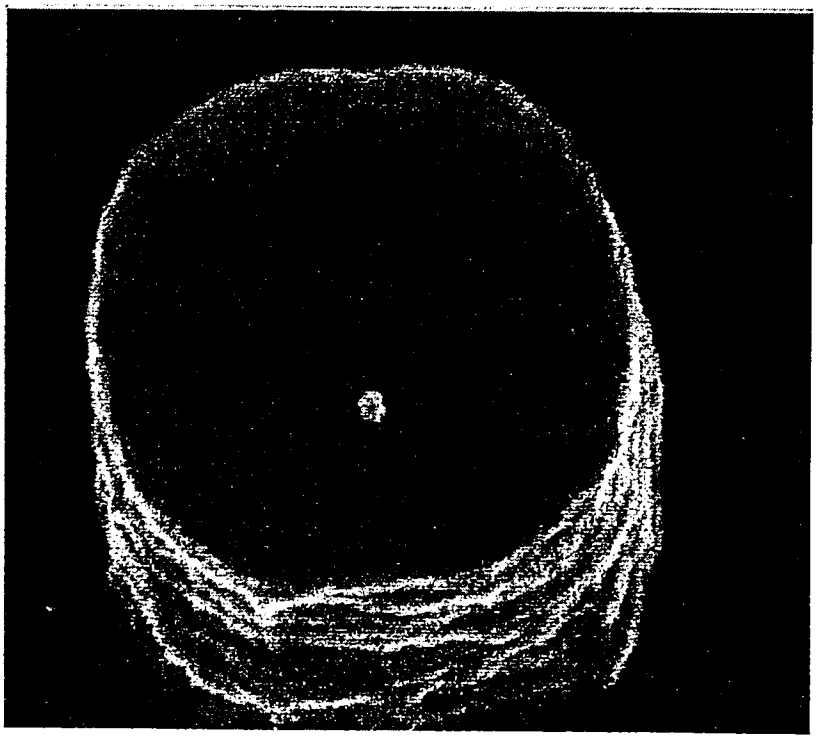


圖43

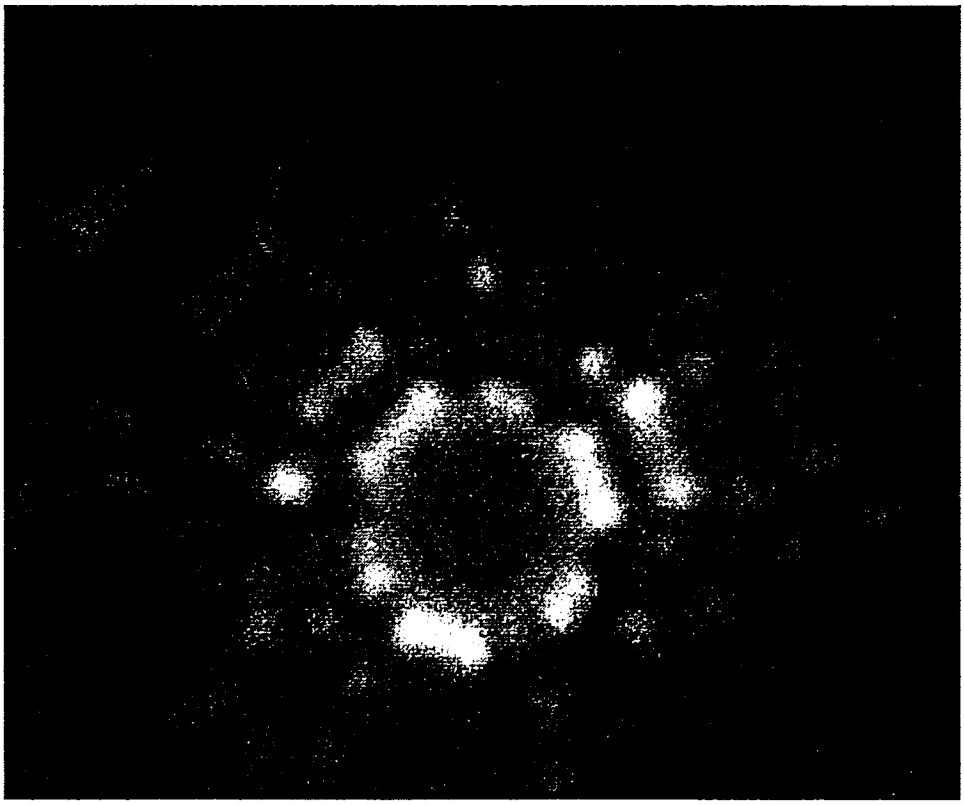


圖44

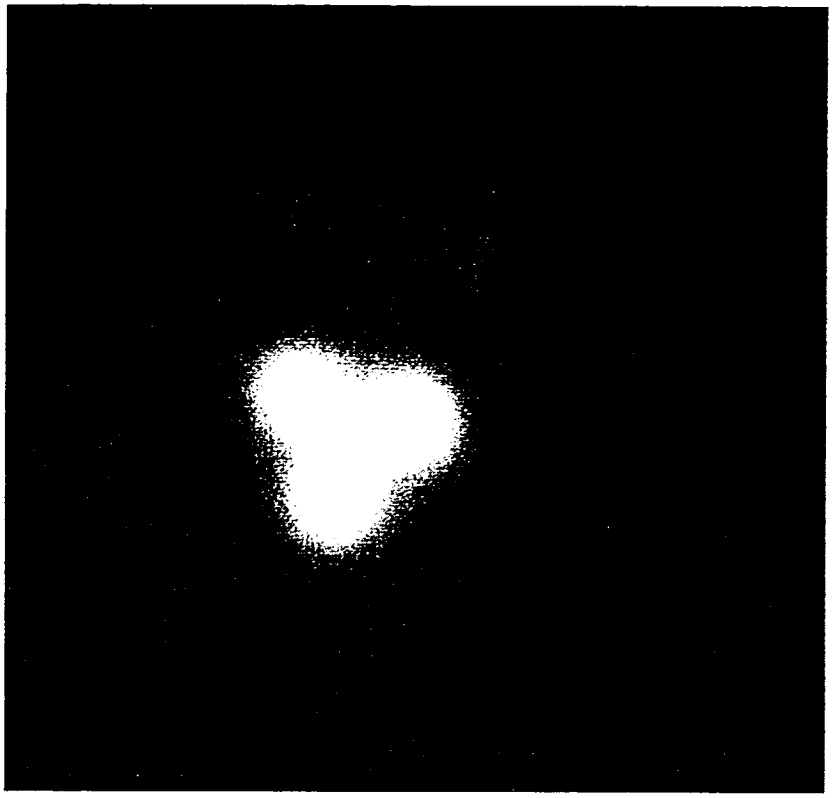


圖45

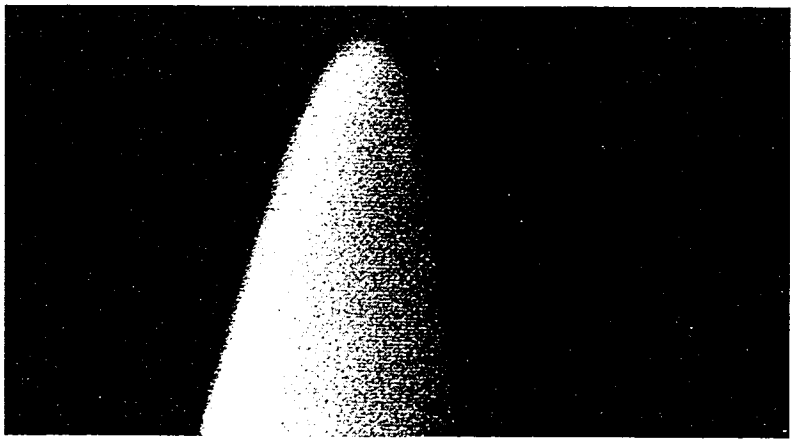


圖46

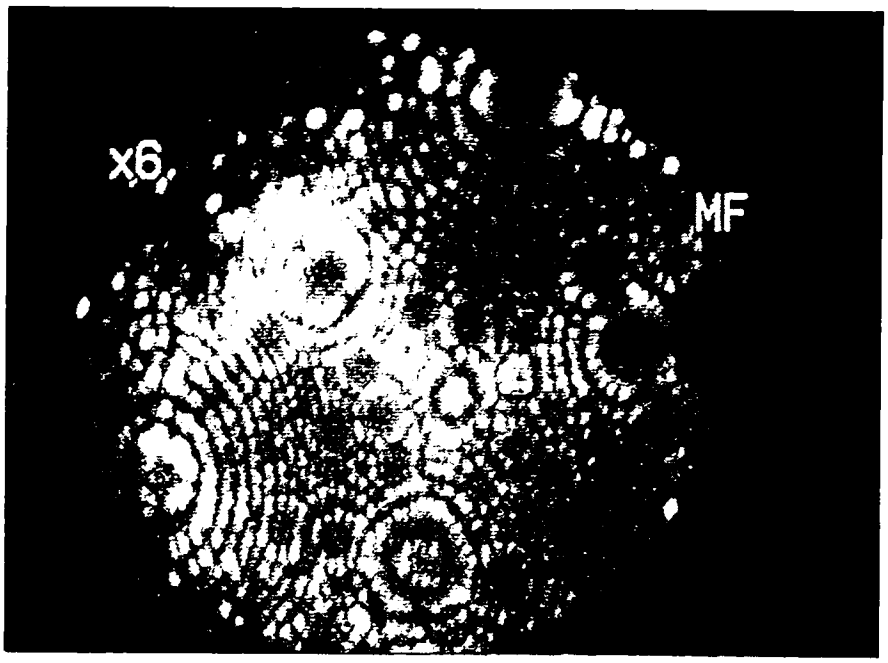


圖47



圖48

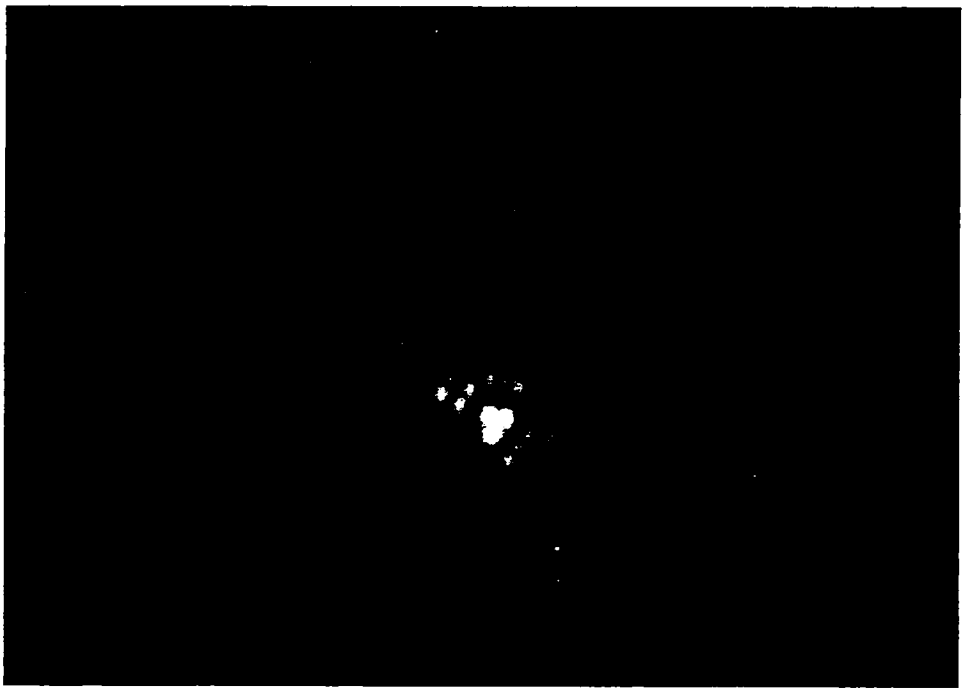


圖49



圖50

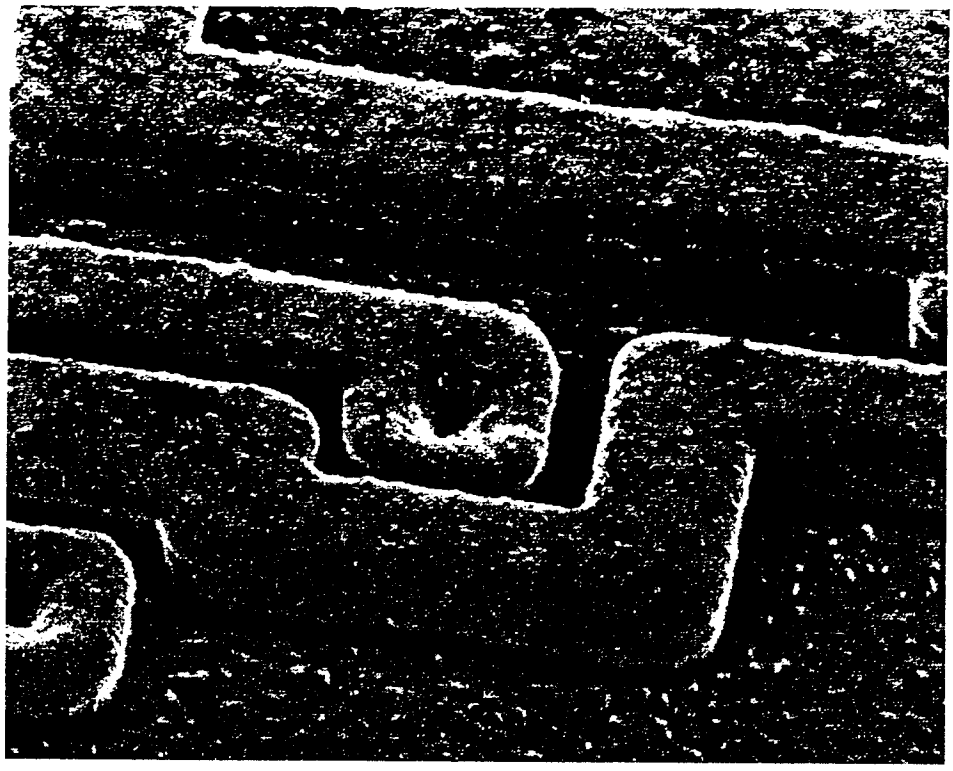


圖51

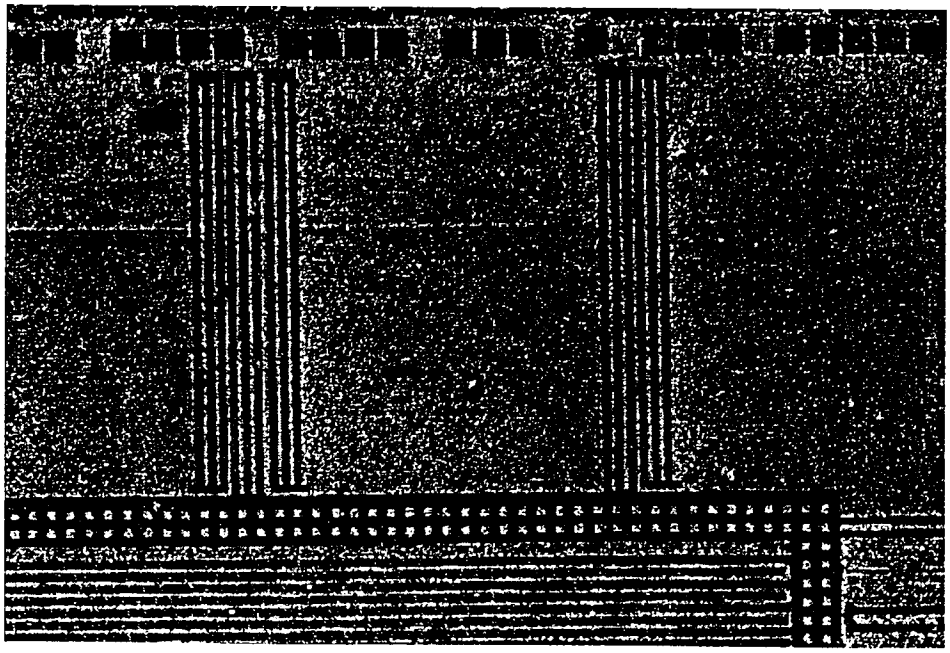


圖52

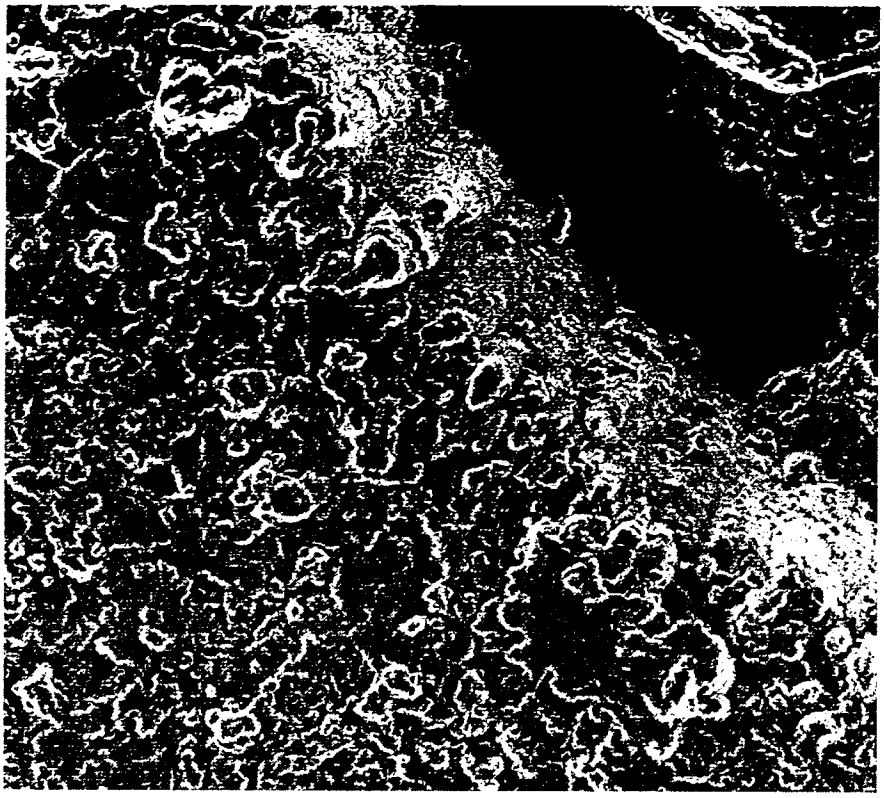


圖53

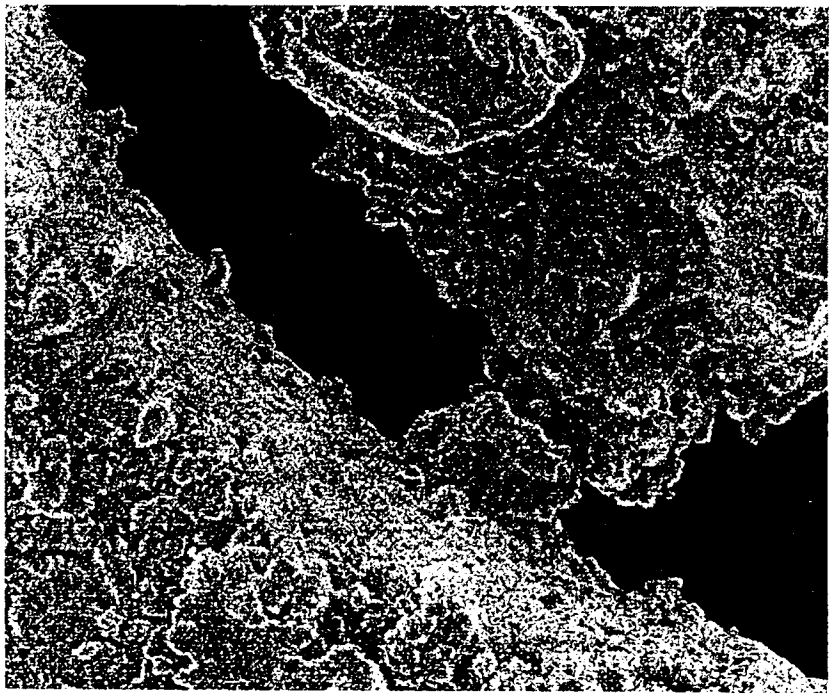


圖54

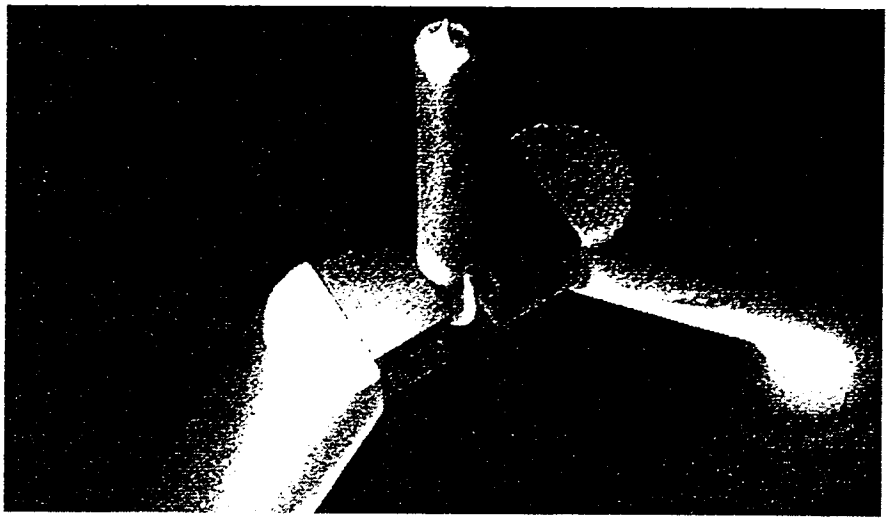


圖57

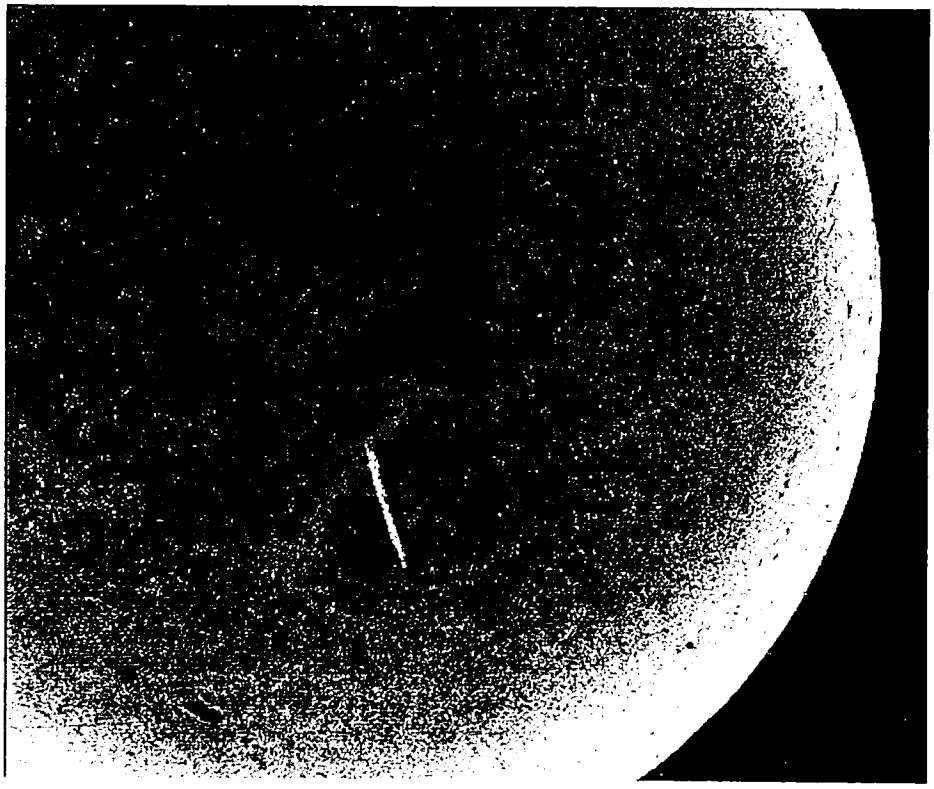


圖58



圖59A

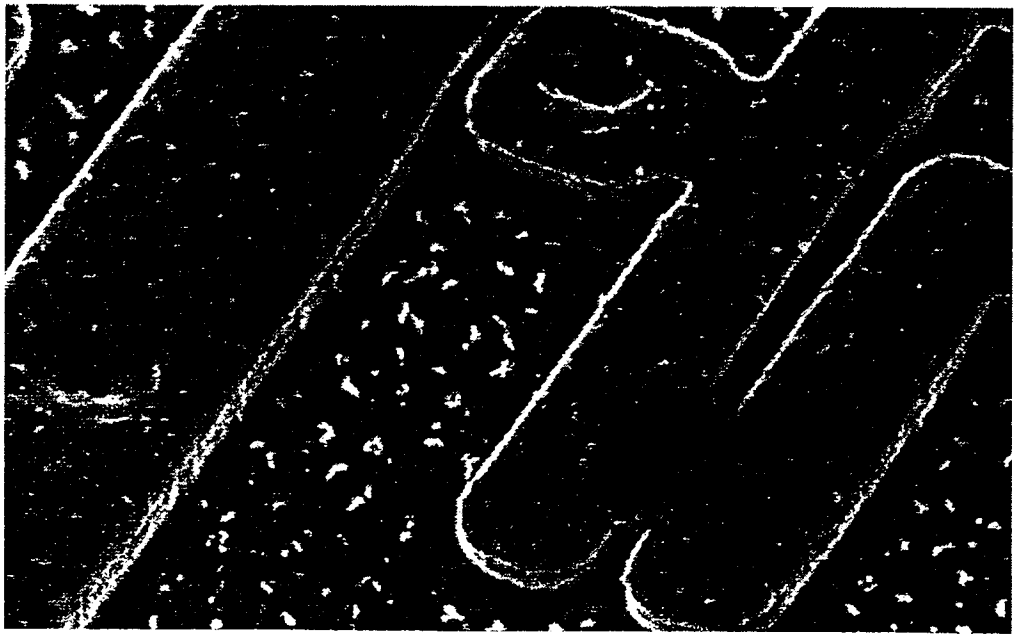


圖59B

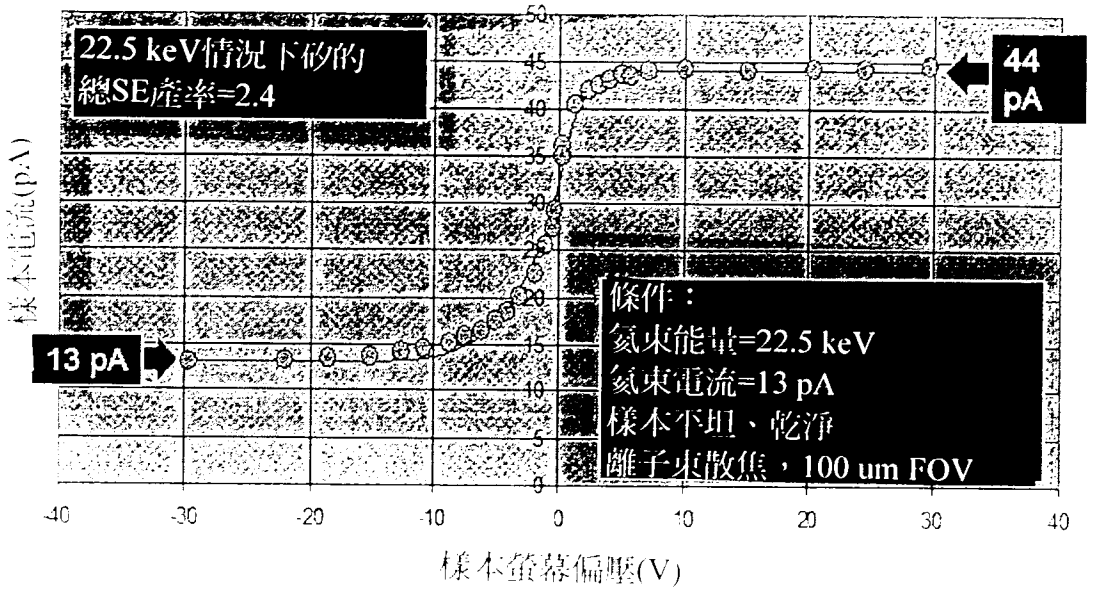

22.5 keV情況下矽的
總SE產率=2.4
44
pA
13 pA
條件：
氦束能量=22.5 keV
氦束電流=13 pA
樣本平坦、乾淨
離子束散焦，100 um FOV
樣本電流(pA)
樣本螢幕偏壓(V)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-40
-30
-20
-10
0
10
20
30
40

圖60

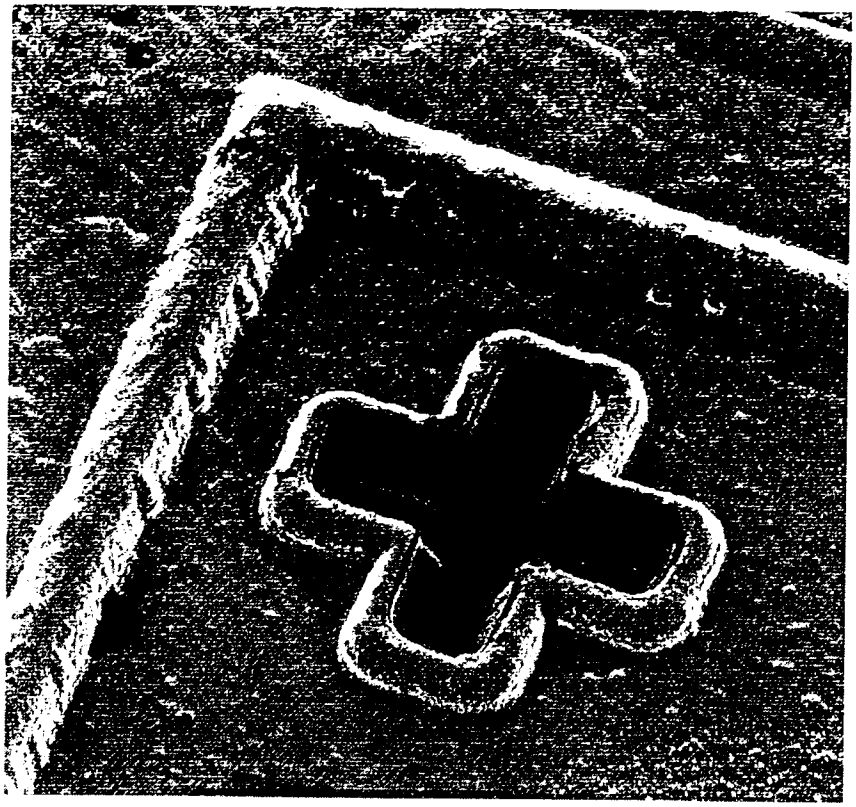


圖61A

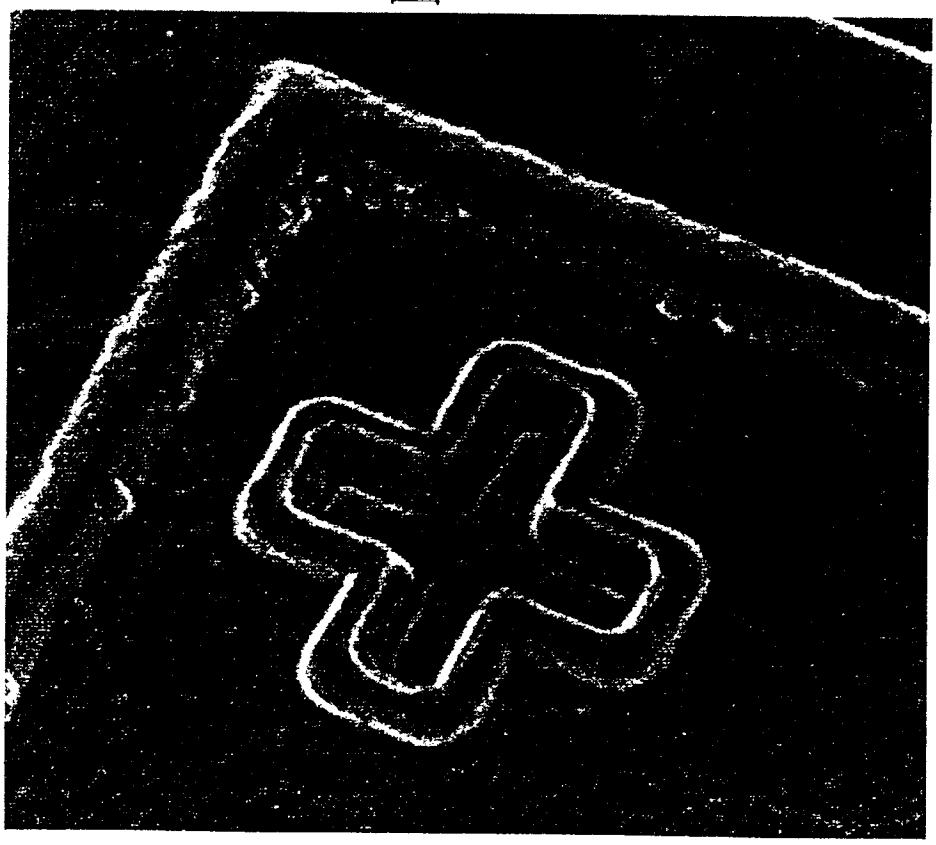


圖61B

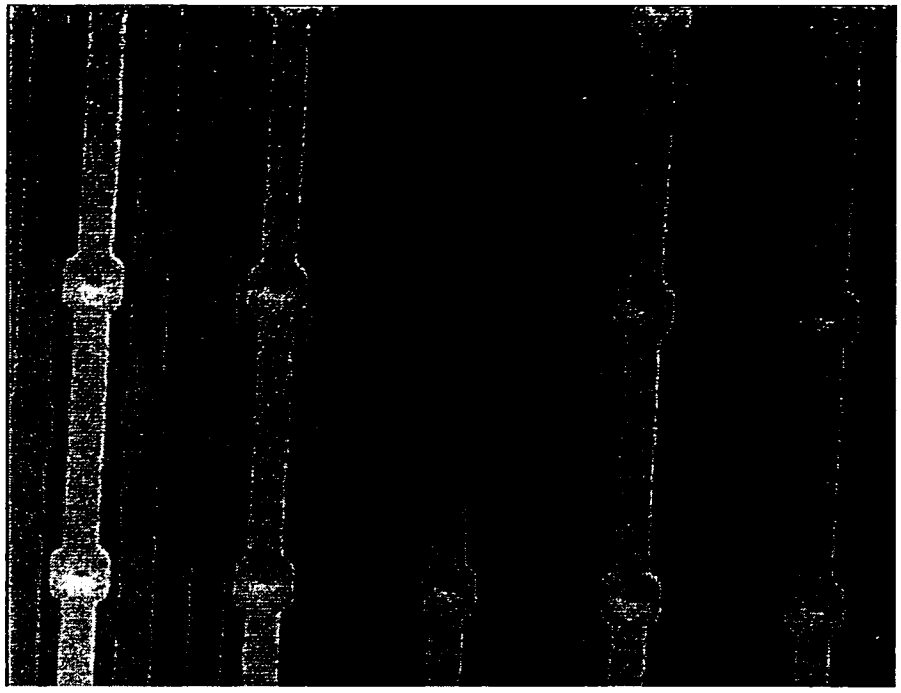


圖62

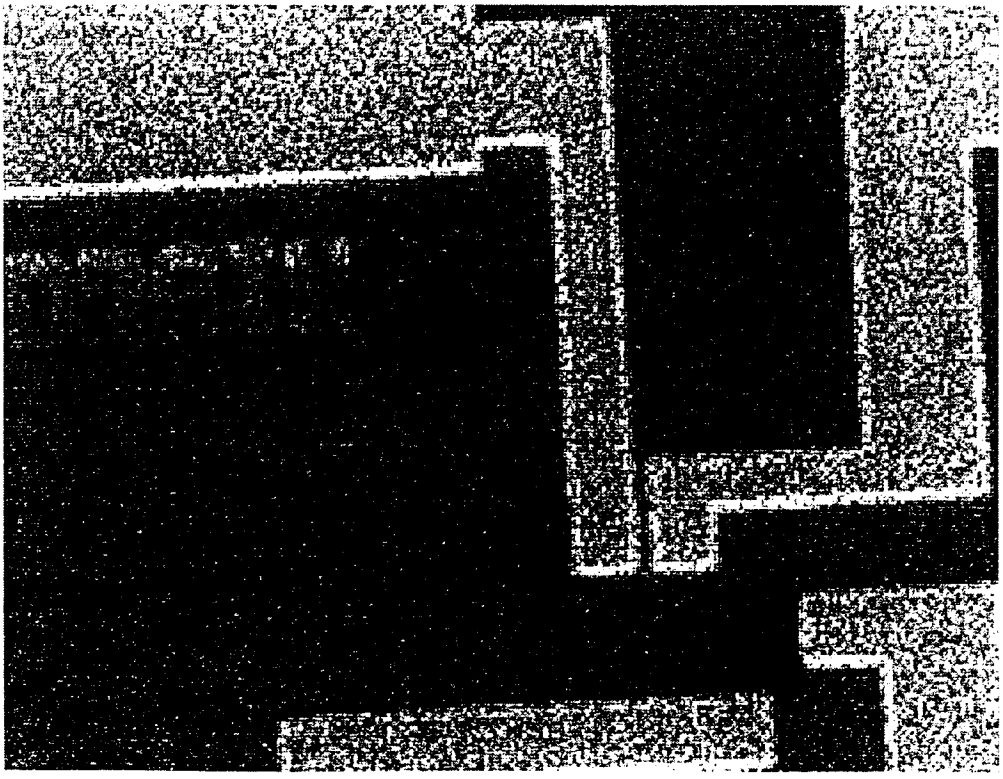


圖63

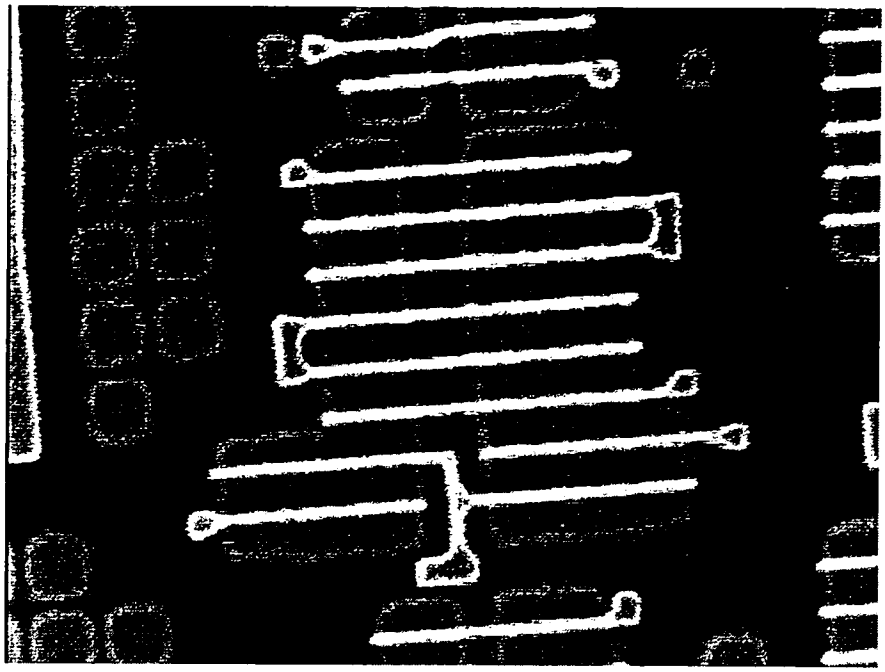


圖64

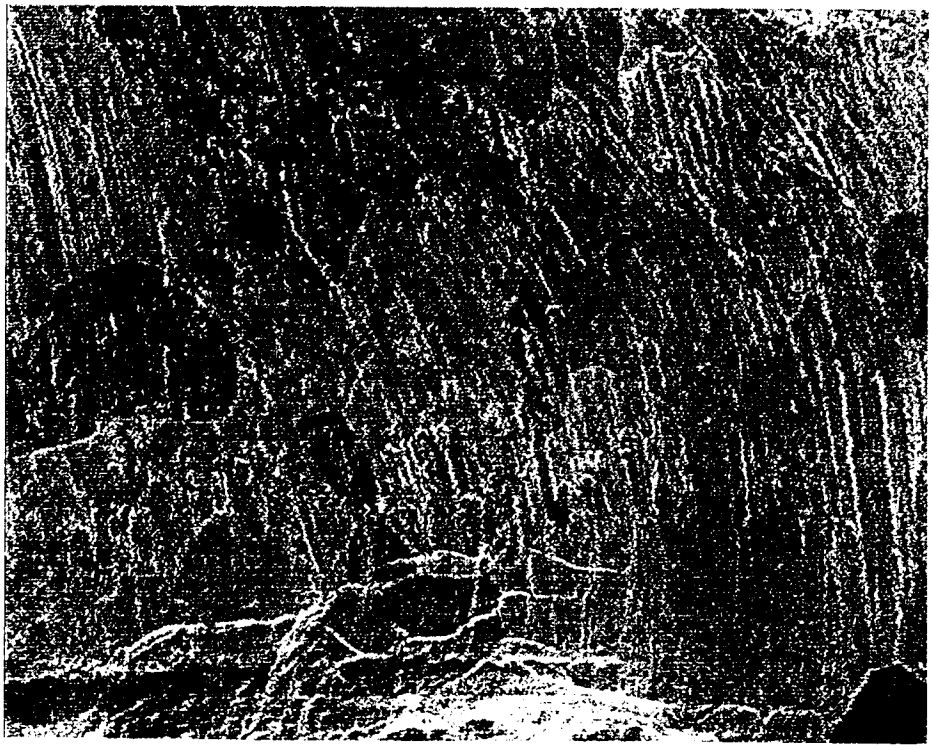


圖65

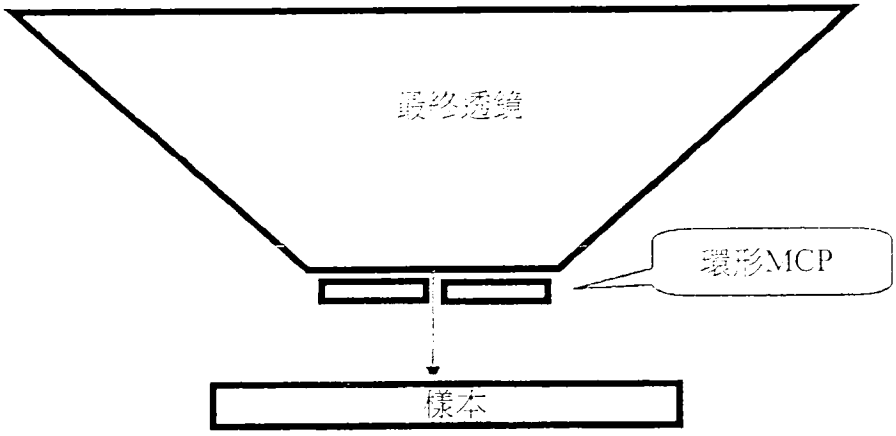


圖66

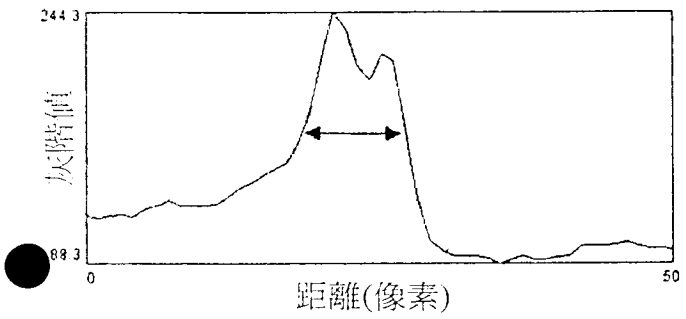


圖67A

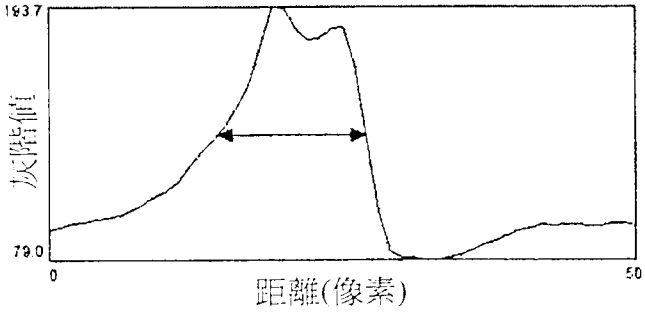


圖67B



圖68

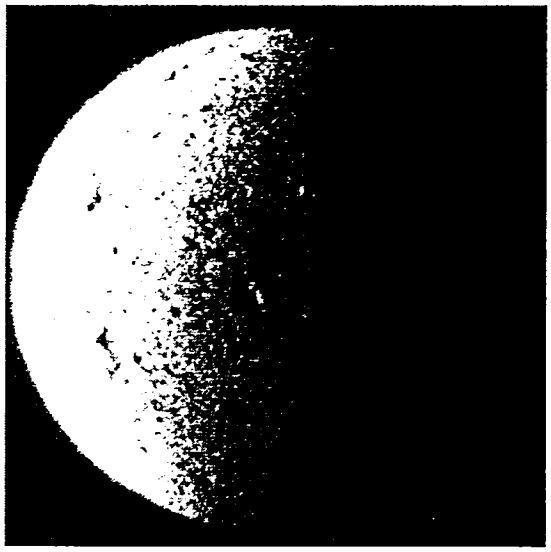


圖69A

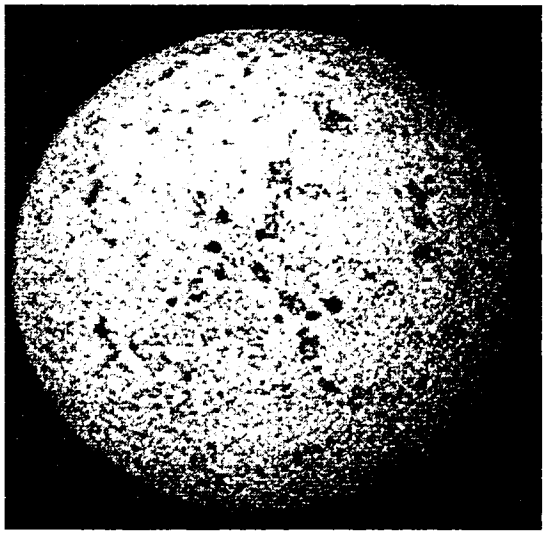


圖69B

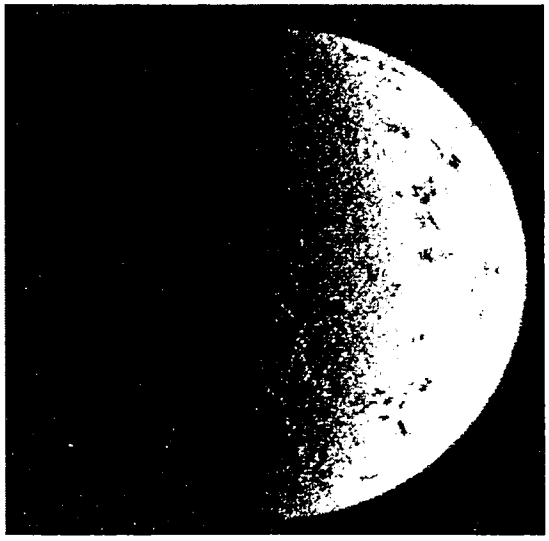


圖69C

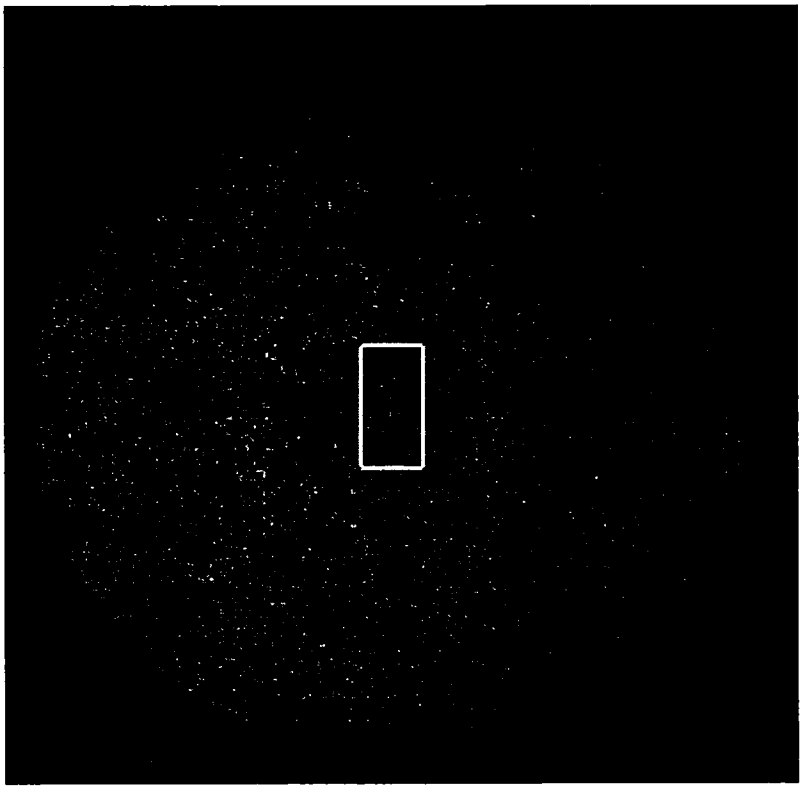


圖70A

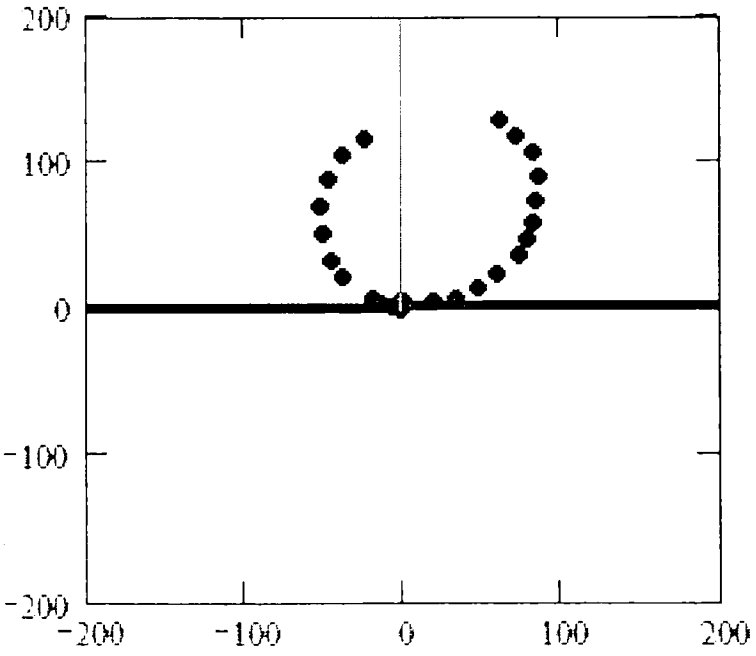


圖70B

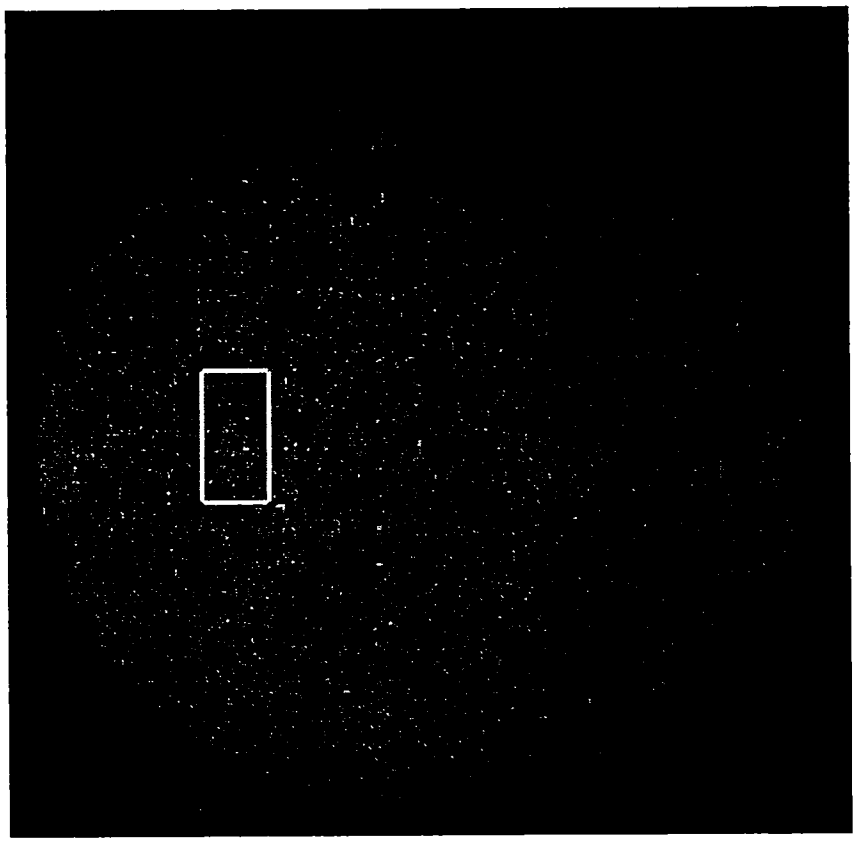


圖71A

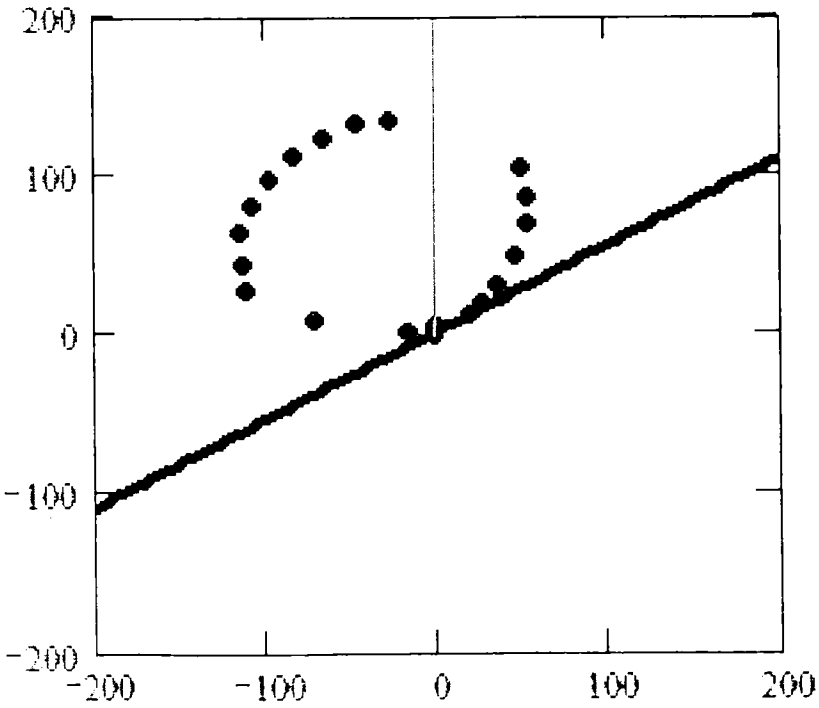


圖71B

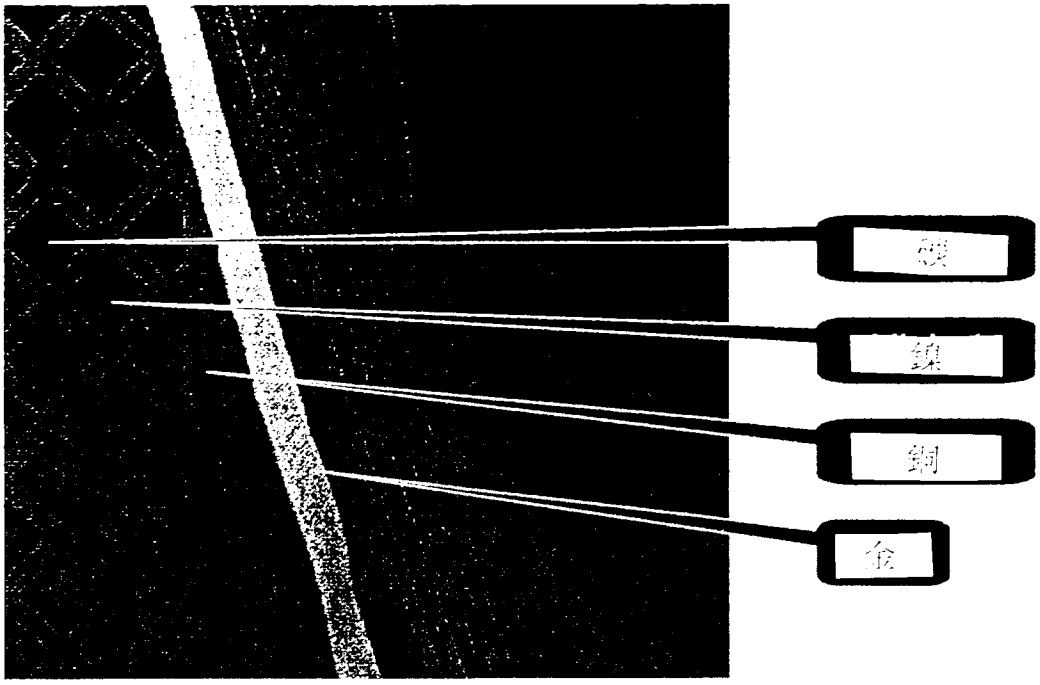


圖72

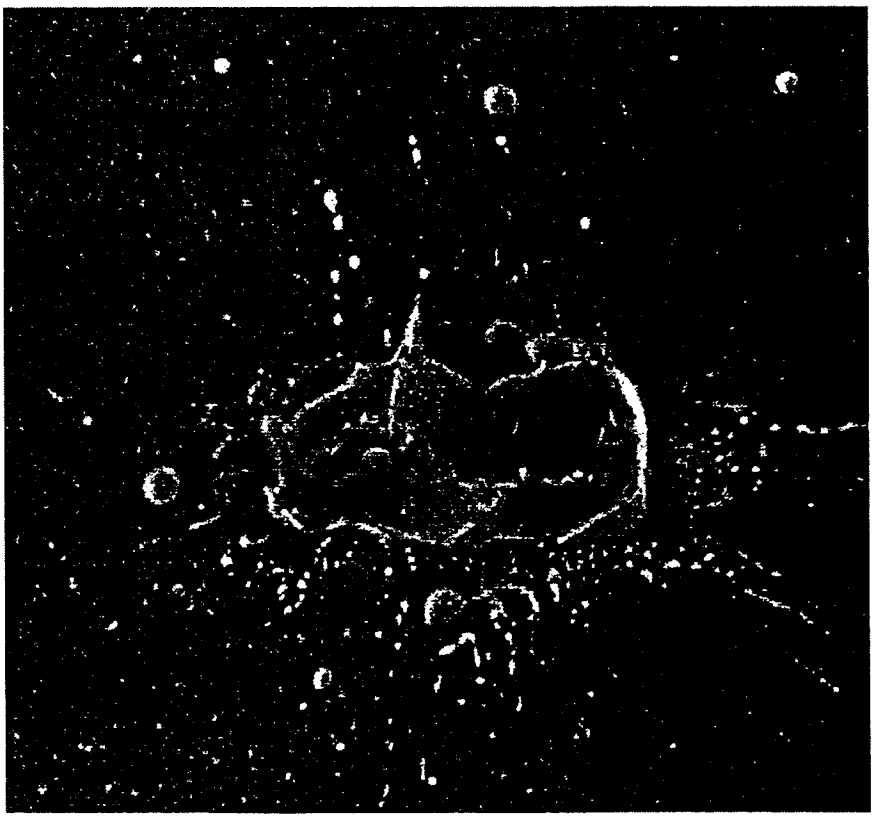


圖73

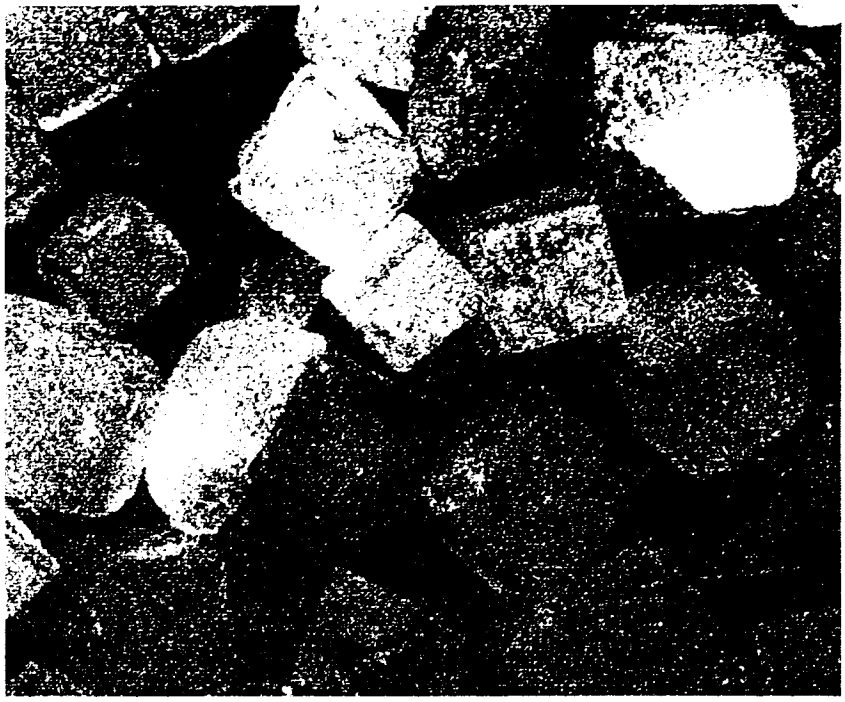


圖74

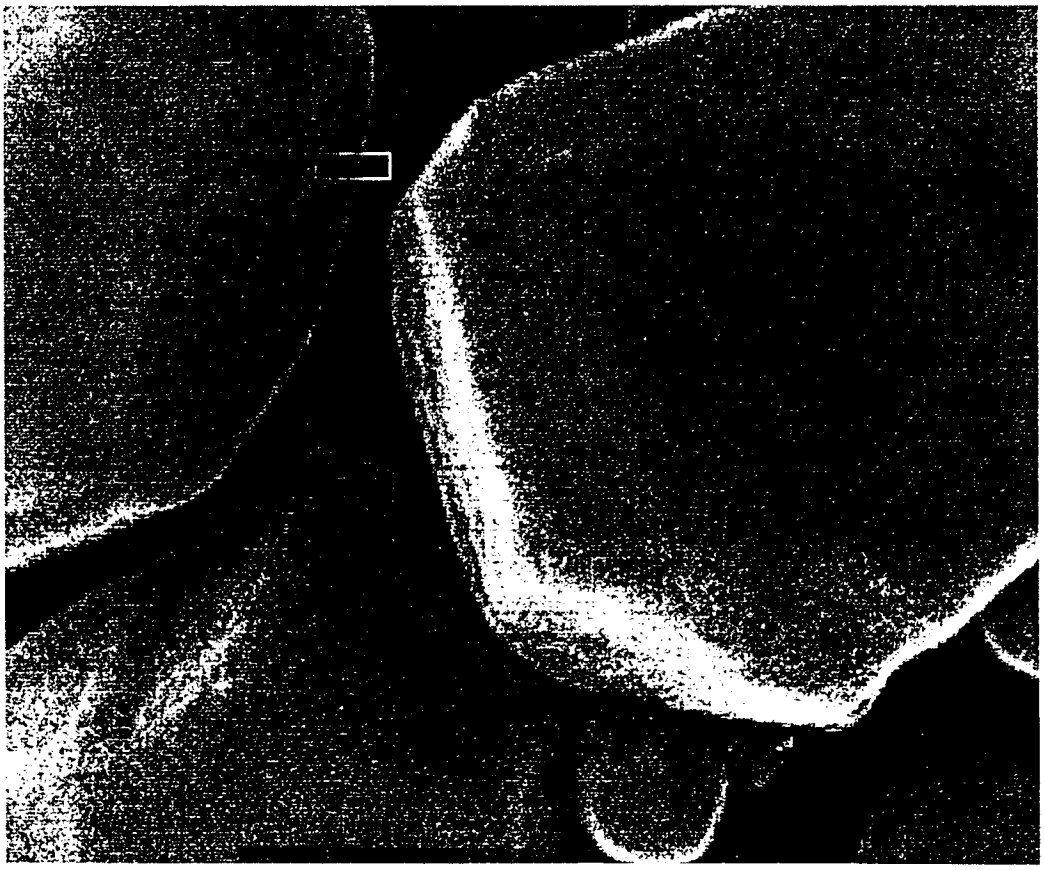


圖75



圖76

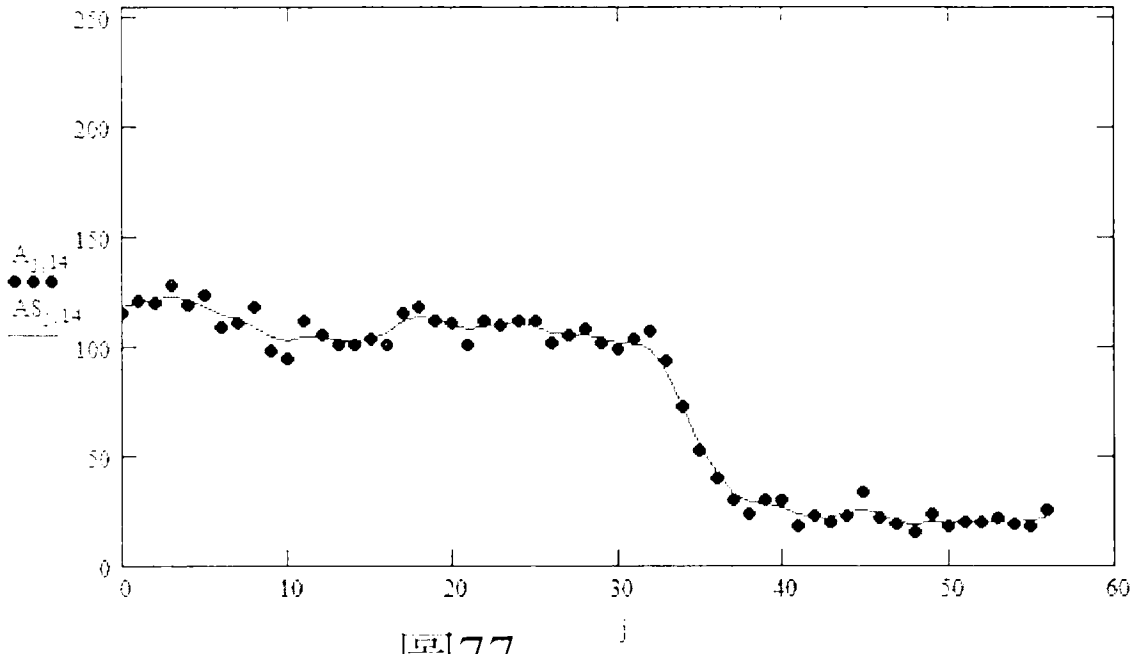

250
200
150
100
50
0
0
10
20
30
40
50
60
j

圖77

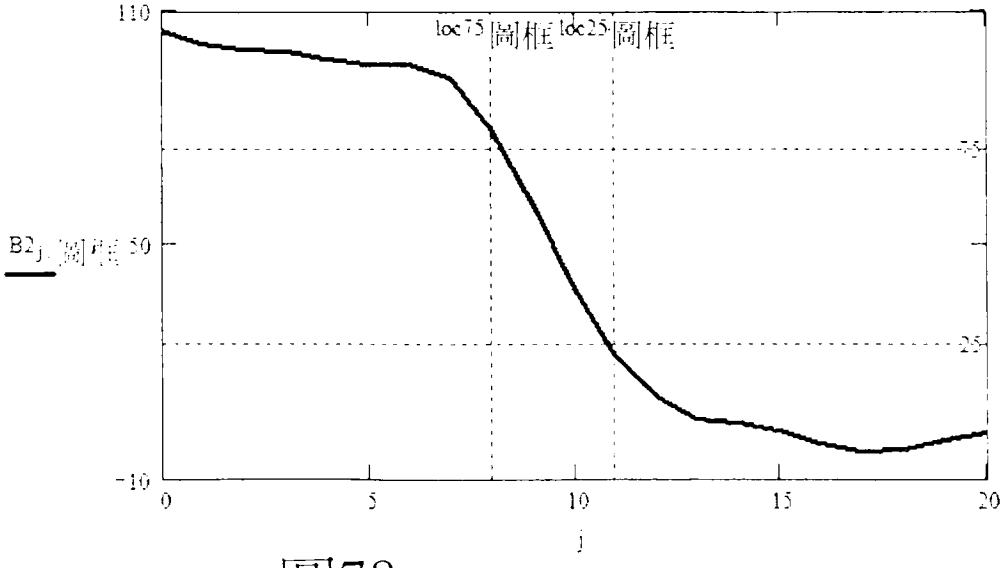

110
50
-10
0
5
10
15
20
j
loc75 圖框
loc25 圖框
55
25

圖78

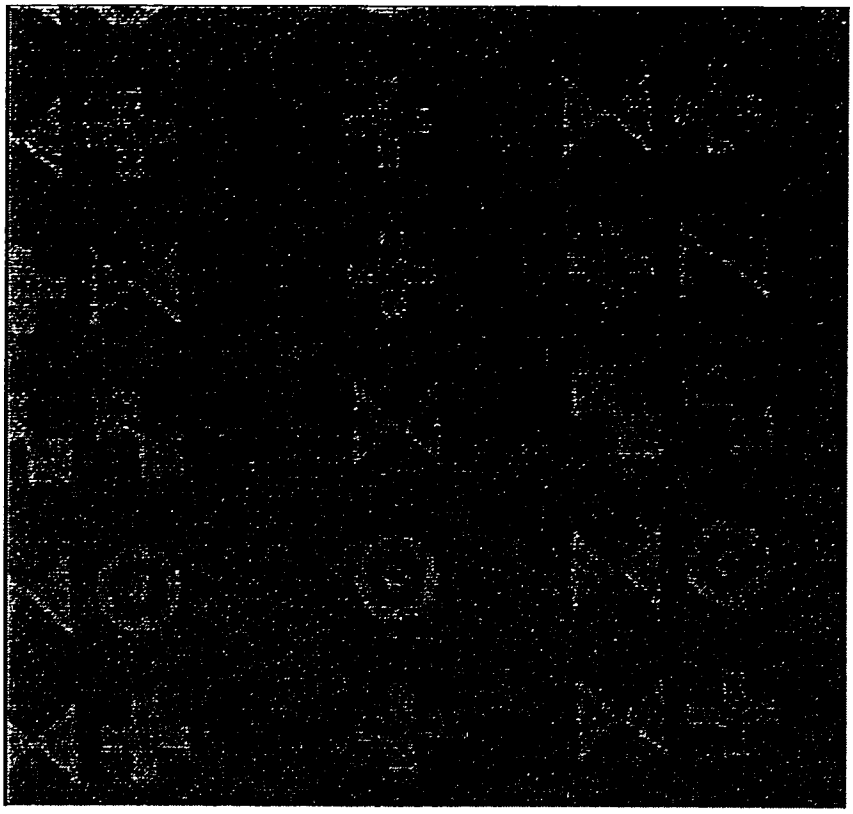


圖79

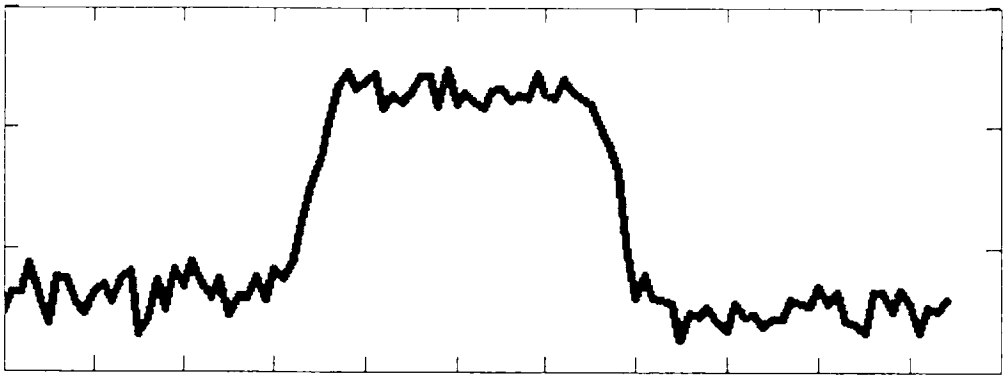


圖80

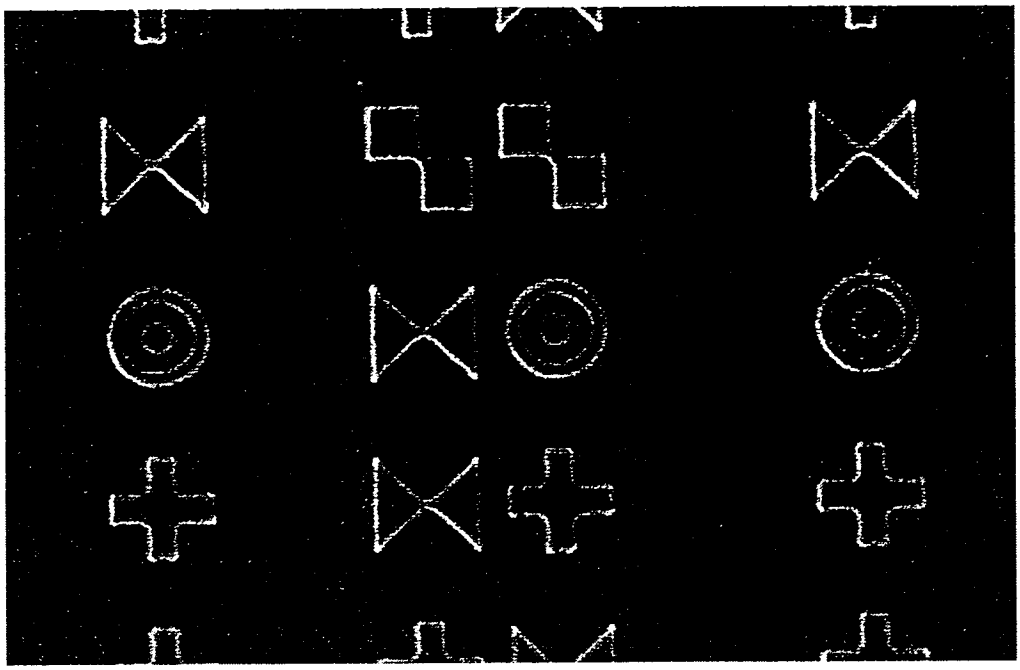


圖81

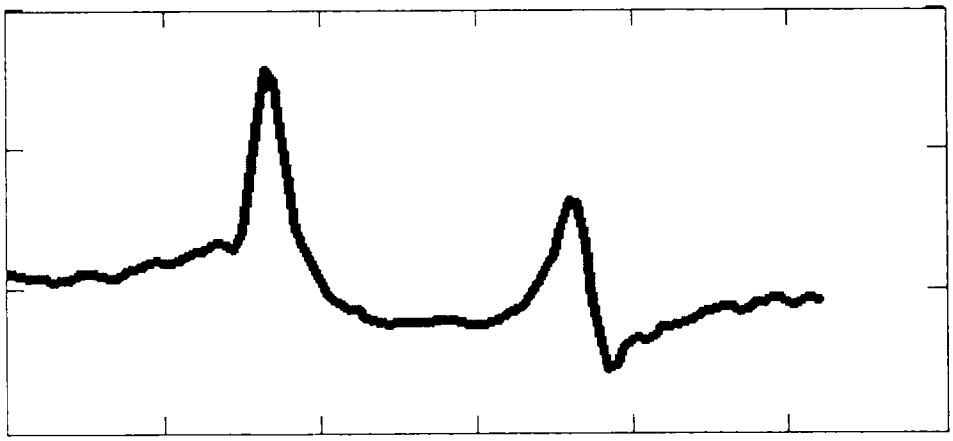


圖82

七、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：第（ 1 ）圖。

(二)本代表圖之元件符號簡單說明：

100	系統
110	氣體來源
120	氣體場離子源
130	離子光學
140	樣本操縱器
150	前側偵測器
160	背側偵測器
170	電子控制系統
172a-172f	通信線
180	樣本
181	表面
182	氣體
183	表面
192	離子束
194	粒子

八、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

(無)

發明專利說明書

公告本

（本說明書格式、順序及粗體字，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫）

申請案號：95142345

申請日期：95.11.15　　**※IPC 分類：**~~H05H~~ H01J 37/00 (2006.01)
H01J 33/00 (2006.01)
H01J 37/00 (2006.01)
G01N 23/00 (2006.01)

一、發明名稱：（中文/英文）

使離子束與樣本相互作用的方法

Method of interacting an ion beam with a sample

二、申 請 人：（共 1 人）

姓名或名稱：（中文/英文）

美商艾莉絲公司

ALIS CORPORATION

代表人：（中文/英文）

尼可拉斯　P　依可諾莫

ECONOMOU, NICHOLAS P.

住居所或營業所地址：（中文/英文）

美國麻州皮伯迪市科技大道10號

10 TECHNOLOGY DRIVE, PEABODY, MA 01960, U.S.A.

國　籍：（中文/英文）

美國　U.S.A.

記錄的影像，將該等格柵及MCP偏壓電位變更至-50 V，在之上未觀察到任何信號。該些影像之雜訊內容係辨識為對於相同電流、相同像素數目及相同總獲取時間，比該樣本之SEM影像所會獲得之雜訊內容更低。

4.

一尖端係固定於一支撐裝配件5600內並使用範例1所述之方法製造，除了在該支撐裝配件5600內，附著至該來源基座5603之該等二支柱5601與5602係相對彼此預彎曲，如圖56所示。該彎曲允許該加熱器導線跨越一明顯更短的長度。該加熱器導線如範例1所述，即直徑為180 μm的一多晶鎢導線。在該等彎曲支柱5601與5602之情況下，使用5 mm的一加熱器導線。一更短加熱器導線長度之優點在於隨著導線長度減小，一定長度導線的硬度隨之增加。該發射器導線採用通常方式黏附，如範例1所述。

藉由向兩個不同尖端施加相同的力，一尖端固定於如範例1所述之類型的一支撐裝配件內，而另一尖端固定於如圖56所示之支撐裝配件內，來觀察更短加熱器導線硬度增加。比較該等二尖端回應施加力之偏轉。比較範例1類型的支撐基座，該彎曲支柱支撐裝配件偏轉小因數6的數量。因此該彎曲支柱型支撐裝配件之自然振動頻率(大約4 kHz)比範例1之支撐裝配件之自然頻率高大約2.5倍。當在實質上低於該自然振動頻率的振動頻率激發時，隨著一更高頻率，該支撐基座及該尖端協調地移動(例如相移忽略不計)。當實施於一氦離子顯微鏡時，該尖端在該彎曲支

十、申請專利範圍：

1. 一種使離子束與樣本相互作用的方法，其包含：

藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用產生一離子束；

使該離子束與包括一特徵之一樣本相互作用，該離子束在一樣本之一表面上具有50 nm或更小之一光點大小；以及

決定該特徵之該大小。

2. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該離子束在該樣本之該表面上具有20 nm或更小之一光點大小。

3. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該離子束在該樣本之該表面上具有10 nm或更小之一光點大小。

4. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，該樣本包含一半導體物品。

5. 如請求項4之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵包含一線路。

6. 如請求項5之使離子束與樣本相互作用的方法，其中多次測量該特徵之該大小，以提供關於該特徵之該大小的統計資訊。

7. 如請求項6之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該方法測量線路邊緣粗糙度。

8. 如請求項6之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該

方法測量線路寬度粗糙度。

9. 如請求項4之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該方法測量線路邊緣粗糙度。

10. 如請求項4之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該方法測量線路寬度粗糙度。

11. 如請求項5之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該線路包含導電材料。

12. 如請求項5之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該線路包含一光阻材料。

13. 如請求項4之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有100 nm或更小之一線性尺寸。

14. 如請求項4之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有75 nm或更小之一線性尺寸。

15. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有100 nm或更小之一線性尺寸。

16. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有75 nm或更小之一線性尺寸。

17. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有50 nm或更小之一線性尺寸。

18. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有25 nm或更小之一線性尺寸。

19. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有20 nm或更小之一線性尺寸。

20. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該

特徵具有15 nm或更小之一線性尺寸。

21. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有10 nm或更小之一線性尺寸。

22. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有5nm或更小之一線性尺寸。

23. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有4nm或更小之一線性尺寸。

24. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有3nm或更小之一線性尺寸。

25. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有2nm或更小之一線性尺寸。

26. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該特徵具有1nm或更小之一線性尺寸。

27. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該離子束具有$1x10^{-16}$ cm^2srV或更小之一減小展度。

28. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該離子束具有$5x10^{-21}$ cm^2sr或更小之一展度。

29. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該離子束在該樣本之一表面具有$5x10^{8}$ A/m^2srV或更大的一減小亮度。

30. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該離子束在該樣本之一表面具有$1x10^{9}$ A/cm^2sr或更大的一亮度。

31. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中使

用一氣體場離子顯微鏡實行該方法。

32. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中使用一氦離子顯微鏡實行該方法。

33. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中使用一掃描離子顯微鏡實行該方法。

34. 如請求項1之使離子束與樣本相互作用的方法，其中使用一掃描氦離子顯微鏡實行該方法。

35. 一種使離子束與樣本相互作用的方法，其包含：

藉由使一氣體與一氣體場離子源相互作用產生一離子束；

使該離子束與一樣本相互作用，以使多個粒子離開該樣本，該樣本具有包括第一及第二層之多個堆疊層；以及

偵測該等粒子，以決定該第二層是否與該第一層對齊。

36. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該等第一與第二層間存在至少一層。

37. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該樣本包含一半導體物品。

38. 如請求項37之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該第一層包含一第一金屬特徵。

39. 如請求項38之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該第二層包含一第二金屬特徵。

40. 如請求項39之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該

方法將該等第一及第二金屬特徵對齊。

41. 如請求項38之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該第二層包含一半導體特徵。

42. 如請求項41之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該方法將該第一金屬特徵及該半導體特徵對齊。

43. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將該等第一及第二層對齊至100 nm內。

44. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將該等第一及第二層對齊至75 nm內。

45. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將該等第一及第二層對齊至50 nm內。

46. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將該等第一及第二層對齊至25 nm內。

47. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將該等第一及第二層對齊至15 nm內。

48. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將該等第一及第二層對齊至10 nm內。

49. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將該等第一及第二層對齊至5nm內。

50. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將該等第一及第二層對齊至4nm內。

51. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將該等第一及第二層對齊至3nm內。

52. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將

該等第一及第二層對齊至2nm內。

53. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將該等第一及第二層對齊至1 nm內。

54. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中將該等第一及第二層對齊至0.1 nm內。

55. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中不使用一對準標記來對齊該等第一及第二層。

56. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該離子束具有$1x10^{-16}$ cm^2srV或更小之一減小展度。

57. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該離子束具有$5x10^{-21}$ cm^2sr或更小之一展度。

58. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該離子束在該樣本之一表面具有$5x10^{8}$ A/m^2srV或更大的一減小亮度。

59. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該離子束在該樣本之一表面具有$1x10^{9}$ A/cm^2sr或更大的一亮度。

60. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中該離子束在該樣本之該表面上具有10 nm或更小之一光點大小。

61. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中使用一氣體場離子顯微鏡實行該方法。

62. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中使用一氦離子顯微鏡實行該方法。

63. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中使用一掃描離子顯微鏡實行該方法。

64. 如請求項35之使離子束與樣本相互作用的方法，其中使用一掃描氦離子顯微鏡實行該方法。

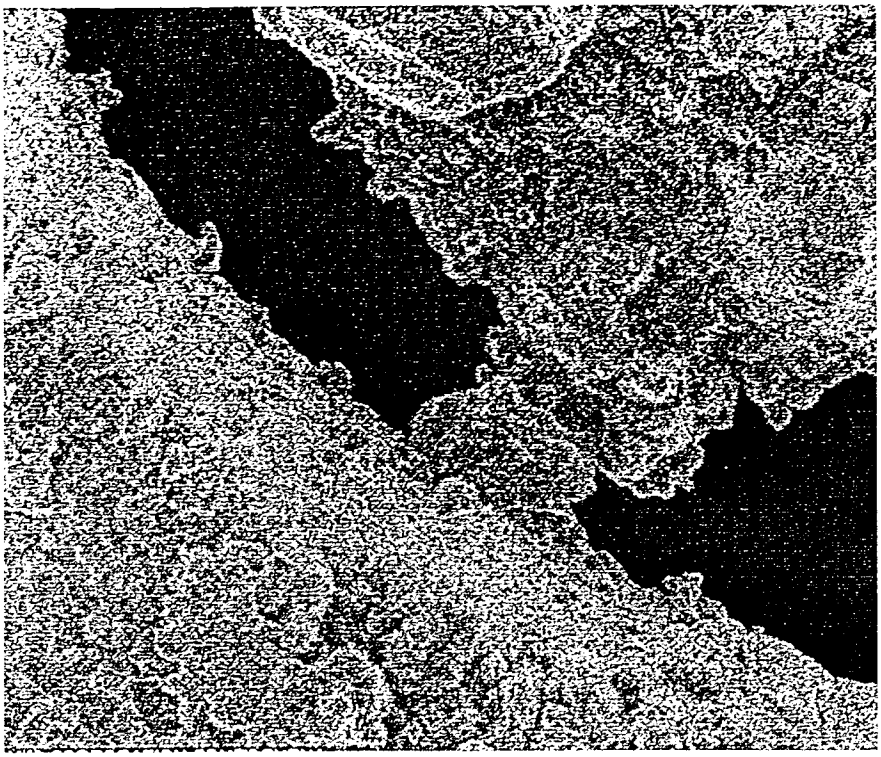


圖55

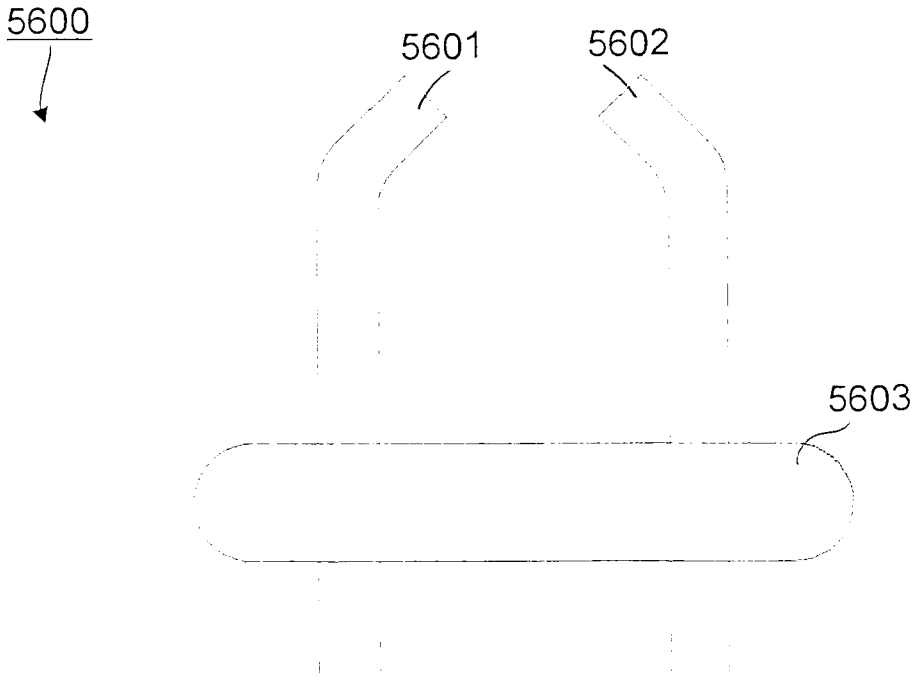


圖56