202425004

(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公開本 (11)公開編號：TW 202425004 A

(43)公開日： 中華民國 113 (2024) 年 06 月 16 日

(21)申請案號：112130906 (22)申請日： 中華民國 112 (2023) 年 08 月 17 日

(51)Int. Cl.： *G16Z99/00 (2019.01)* *H01L21/02 (2006.01)*

(30)優先權：2022/08/17 美國 63/398,753

(71)申請人：美商尼爾森科學有限責任公司 (美國) NIELSON SCIENTIFIC LLC (US)
美國

(72)發明人：尼爾森 格雷戈里 NIELSON, GREGORY (US)

(74)代理人：李世章；彭國洋

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：15 項 圖式數：13 共 62 頁

(54)名稱

平行的三維半導體製造

(57)摘要

本文描述關於透過雷射控制的半導體的電化學蝕刻的各種技術；此雷射發射能量低於半導體的帶隙能量的光。

Various technologies are described herein pertaining to electrochemical etching of a semiconductor controlled by way of a laser that emits light with an energy below a bandgap energy of the semiconductor.

指定代表圖：

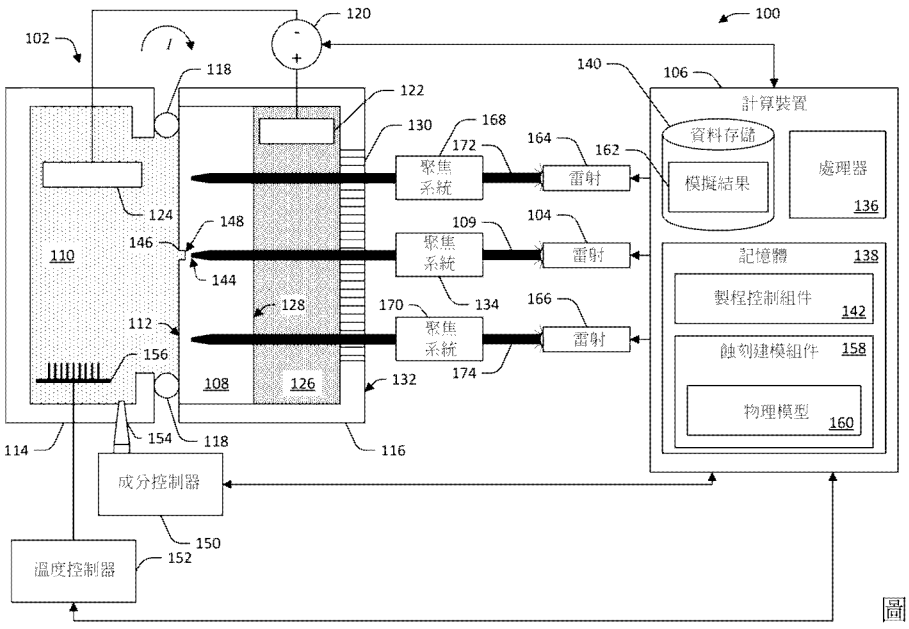


圖 1

符號簡單說明：

100:系統

102:蝕刻腔室

104:雷射

106:計算裝置

108:半導體元件

109:光束

110:蝕刻液

112:第一表面

114:第一容納容器

116:第二容納容器

118:密封件

120:電壓源

122:陽極電極

124:陰極電極

126:導電材料

128:第二表面

130:窗口

132:外表面

134:聚焦系統

136:處理器

138:記憶體

140:資料存儲

142:製程控制組件

144:焦位置

146:蝕刻特徵

148:底表面

150:成分控制器

152:溫度控制器

154:開口

156:加熱/冷卻裝置

158:蝕刻建模組件

160:物理模型

162:模擬結果

164:雷射

166:雷射

168:聚焦系統

170:聚焦系統

172:光束

174:光束

【發明摘要】

【中文發明名稱】平行的三維半導體製造

【英文發明名稱】PARALLELIZED THREE-DIMENSIONAL SEMICONDUCTOR FABRICATION

【中文】

本文描述關於透過雷射控制的半導體的電化學蝕刻的各種技術；此雷射發射能量低於半導體的帶隙能量的光。

【英文】

Various technologies are described herein pertaining to electrochemical etching of a semiconductor controlled by way of a laser that emits light with an energy below a bandgap energy of the semiconductor.

【指定代表圖】第（1）圖。

【代表圖之符號簡單說明】

100：系統

102：蝕刻腔室

104：雷射

106：計算裝置

108：半導體元件

109：光束

110：蝕刻液

112：第一表面

114：第一容納容器

116：第二容納容器

118：密封件

120：電壓源

122：陽極電極

124：陰極電極

126：導電材料

128：第二表面

130：窗口

132：外表面

134：聚焦系統

136：處理器

138：記憶體

140：資料存儲

142：製程控制組件

144：焦位置

146：蝕刻特徵

148：底表面

150：成分控制器

152：溫度控制器

154：開口

156：加熱/冷卻裝置

158：蝕刻建模組件

160：物理模型

162：模擬結果

164：雷射

166：雷射

168：聚焦系統

170：聚焦系統

172：光束

174：光束

【特徵化學式】

無

【發明說明書】

【中文發明名稱】平行的三維半導體製造

【英文發明名稱】PARALLELIZED THREE-DIMENSIONAL SEMICONDUCTOR FABRICATION

【技術領域】

【0001】 本申請案涉及利用雷射的半導體製造。

【先前技術】

【0002】 微細加工是指用於製造積體電路(IC)和微機電系統(MEMS)的多種技術。透過習知的微細加工技術所製造的IC和MEMS具有微米或奈米量級的特徵尺寸。習知地，IC和MEMS的微細加工是一種逐層製程，其中沉積半導體層（及各種其他材料）、使用光刻工具進行圖案化，接著進行蝕刻以界定最終幾何形狀的一部分。一般來說，這些習知的微細加工技術僅限於創建形狀類似於二維擠壓幾何形狀（有時稱為 2.5D）的結構。

【0003】 此外，這些習知的微細加工技術複雜、耗時且昂貴。在一個示例中，元件的單層的製造可包括以下步驟：1)在基板或晶圓上沉積薄膜、2)用光阻劑光罩層塗覆薄膜、3)對光阻劑光罩層進行光刻圖案化、4)穿過光阻劑光罩層蝕刻薄膜層、5)剝離光阻劑光罩層，及6)在用類似方式沉積和圖案化後續層之前，徹底清潔基板或晶圓。

【發明內容】

【0004】 下文是本文更詳細描述的標的之簡要概述。此簡要概述無意限制本案請求項的範疇。

【0005】 本文描述與藉由半導體的選擇性蝕刻來製造半導體中的結構有關的各種技術。這些技術適用於在半導體中製造各種三維（3D）結構（例如，三維空洞）。此外，這些技術適合以比習知選擇性蝕刻技術通常可實現的特徵尺寸更小的特徵尺寸來蝕刻半導體中的結構。

【0006】 在各種示例性實施例中，藉由暴露於蝕刻劑溶液的半導體的表面處的電化學反應來蝕刻半導體。基於半導體的原子晶格中電洞的受控生成（即，晶格中不存在電子，通常將其建模為稱為電洞的帶正電粒子），來選擇性地蝕刻半導體的暴露表面。在蝕刻反應中，半導體暴露表面處的電洞引起半導體的氧化，該氧化隨後由蝕刻劑溶液蝕刻。透過能量低於半導體的帶隙能量的照射源（例如，雷射）照射半導體，來選擇性地生成電洞。單一的子帶隙能量光子沒有足夠的能量將半導體中的電子從價帶移動到傳導帶。因此，通常的子帶隙能量光不能在半導體的原子晶格中生成電洞。將照射源所發射的子帶隙能量光聚焦到足夠強的焦斑，以在半導體內引起多光子吸收（MPA）。當此種情況發生時，多個光子的光子能量經組合以超過半導體的帶隙能量，將電子從價帶激發到傳導帶，從而在照射源的焦斑處的半導體的原子晶格中生成電洞。可在期望進行蝕刻的照射源的焦斑附近的區域中選擇性地形成電洞，從而將蝕刻限制在焦斑附近的區域。

【0007】 由於照射源所發射的光是不經歷線性吸收的子帶隙能量光，因此半導體對於照射源所發射的光來說是透明

的。藉由在半導體的主體內移動照射源的焦斑，可選擇性地控制半導體的蝕刻發生在根據習知半導體蝕刻方法無法蝕刻的位置。因此，可在半導體的主體內蝕刻出習知的微細加工技術不易生成的三維特徵。在示例性的實施例中，可將照射源定位為面向與暴露於蝕刻劑溶液的表面相對的半導體的第二表面(例如，背側表面)。在本實施例中，照射源會向半導體的第二表面發射光且光穿過半導體到達半導體的主體內的焦斑。穿過與蝕刻表面相對的第二表面的對半導體的照射避免了所發射的光的潛在散射，其可能導致不期望的半導體蝕刻或可能降低半導體特徵的可實現的解析度。

【0008】 在其他示例性的實施例中，透過結合半導體內的電荷載流子傳輸的物理模型的計算裝置來控制照射源。一般而言，在半導體中的第一位置處生成的電洞可在由電場、載流子擴散等引起的各種力的作用下在半導體內移動。因此，在某些情況下，在半導體中的第一位置處生成的電洞可移動到半導體中除了需要蝕刻的位置之外的位置。藉由結合電荷載流子傳輸的物理模型，計算裝置可控制照射源以使得藉由所發射的光在電洞最終遷移到所需蝕刻位置的該些位置處生成電洞。舉例來說，計算裝置設定有半導體中期望蝕刻的位置。計算裝置基於物理模型輸出預測，其中預測指示在第一位置處建立的電洞預計會遷移到期望的蝕刻位置。物理模型可基於半導體中的電荷載流子擴散、施加到半導體的電場（例如，透過偏壓）及驅動

蝕刻反應的電化學單元中的電流，來輸出預測。計算裝置接著控制照射源的輸出，以使照射源利用其在由物理模型預測的第一位置處的焦斑來照射半導體。

【0009】 上述概述呈現簡化概述，以便提供對本文所討論的系統及/或方法的一些態樣的基本理解。此概述並非為本文所討論的系統及/或方法的廣泛概述；並無意於識別關鍵/必要元素或描繪此類系統及/或方法的範圍。此概述的唯一目的是以簡化形式呈現一些概念，以作為稍後呈現的更詳細描述的前奏。

【圖式簡單說明】

【0010】 圖1是助於由子帶隙能量雷射所控制的半導體的選擇性蝕刻的示例性系統的圖。

【0011】 圖2是子帶隙能量照射源的焦斑附近的MPA的概念圖。

【0012】 圖3是感應電場影響下的電洞漂移的概念圖。

【0013】 圖4是說明半導體中的電洞的生成和遷移的概念圖。

【0014】 圖5是示出電場聚焦對半導體中的電洞遷移的影響的概念圖。

【0015】 圖6是示例性的次表面半導體蝕刻的圖。

【0016】 圖7是圖6所示的次表面半導體蝕刻的三維表示。

【0017】 圖8是助於由複數個子帶隙能量雷射所控制的半導體的選擇性蝕刻的另一個示例性系統的圖。

【0018】 圖9是示出在兩個雷射光束的重疊區域中生成電荷載流子的圖。

【0019】 圖10是示例性的照射位置序列的圖。

【0020】 圖11是示出色散聚焦系統的圖。

【0021】 圖12是示出示例性的針對由子帶隙能量雷射所控制的選擇性半導體蝕刻的方法的流程圖。

【0022】 圖13是示例性的計算系統。

【實施方式】

【0023】 現在參考附圖來描述與光控選擇性半導體蝕刻相關的各種技術，其中貫穿全文使用相同的元件符號來指稱相同的元件。在下文描述中，出於解釋目的，闡述許多具體細節以便提供對一個或多個態樣的透徹理解。然而，可看出，可在沒有這些具體細節的情況下來實施此(多個)態樣。在其他示例中，以方框圖形式示出眾所周知的結構和元件以便於描述一個或多個態樣。此外，應理解的是，可由多個組件執行經描述為由某些系統組件執行的功能。類似地，例如，組件可經配置為執行經描述為由多個組件執行的功能。

【0024】 此外，術語「或」旨在表示包含性的「或」，而非排他性的「或」。也就是說，除非另有說明或從上下文中可清楚地看出，否則短語「X採用A或B」旨在表示任何自然的包含性排列。也就是說，片語「X採用A或B」由任一以下情況滿足，以下情況為：X採用A、X採用B，及X採用A和B兩者。此外，除非另有說明或從上下文中可清楚

看出指向單數形式，否則本說明書和所附申請專利範圍中所使用的冠詞「一」和一般應被解釋為表示「一個或多個」。

【0025】 此外，如本文所使用的，術語「組件」和「系統」旨在涵蓋配置有電腦可執行指令的電腦可讀取資料存儲，此等電腦可執行指令在由處理器執行時導致執行某些功能。電腦可執行指令可包括常式、功能或諸如此類。亦應理解的是，組件或系統可位於單一裝置上或分佈在多個裝置上。此外，如本文所使用，術語「示例性」旨在表示用作某事物的說明或示例，而不旨在指示優先的選擇。

【0026】 應理解的是，如本文所使用，半導體晶格中的「電洞」是指在半導體晶格中的位置處不存在電子。雖然本文參考與作為有形實體的電洞相關的各種動作和事件，但應當理解的是，此解釋僅旨在促進對各個態樣的理解並可反映內在物理製程中的一些不準確性。例如，雖然本文提到電場對電洞施加力並引起電洞運動，但應當理解的是，電場實際上是對半導體晶格中的電子施加力，從而引起電子運動；可藉由將電洞概念化為虛擬粒子來適當地描述此種運動的結果。對電洞的此些引用是為了便於理解，且對電洞的此些引用與半導體製造領域中通常採用的描述一致。

【0027】 參考圖1，示出助於選擇性控制的半導體蝕刻的示例性的系統100。系統100包括蝕刻腔室102、雷射104及控制雷射104的計算裝置106。蝕刻腔室102包括經期望蝕刻的半導體元件108，及在半導體108的原子晶格中存在電洞的位置處選擇性地氧化和蝕刻半導體108的蝕刻液

110。雷射104基於從計算裝置106接收到的控制訊號在半導體108處發射光束109，以便在半導體108中的特定區域處生成電洞。接著在所生成的孔遷移到暴露於蝕刻液110的半導體108的第一表面112的位置處，藉由蝕刻液110來蝕刻半導體108。因此，控制雷射104以基於雷射104在半導體108中生成電洞的位置，在期望的位置處蝕刻半導體108。

【0028】 基於半導體108的化學組成來選擇蝕刻液110的成分。作為示例而非限制，在半導體108包括矽或其他碳族元素(例如，矽、碳和鍺等)的應用中，蝕刻液110可包括氫氟酸(HF)。例如，蝕刻液110可以是1%至30%HF的溶液。在其他實施例中，也可使用為反應提供氟原子的其他化學品，如氫氧化銨/氟化銨。在各種實施例中，蝕刻液110可包括界面活性劑(例如，乙醇、二甲基甲醯胺和乙腈等)；界面活性劑增強蝕刻液110對半導體108的表面112的潤濕並可促進從半導體108的表面112去除蝕刻氣體。在其他示例中，蝕刻液110可包括氫氧化鈉、乙酸、硫酸、丙酸、高氯酸、硫酸鉀或過二硫酸鹽中的至少一者。應理解，本文所述的方法和系統適用於多種半導體的選擇性蝕刻。在一些示例性的實施例中，半導體108包括本徵元素半導體，如矽、碳(鑽石、石墨烯和碳奈米管等等)及鍺等等。在其他示例性的實施例中，半導體108包括III-V族半導體(例如，砷化鎵和磷化銦等等)、III族氮化物(例如，氮化鎵和氮化銦鎵等)、II-VI族半導體(例如，氧化

鋅和碲化鎘等等）或其他半導體化合物（例如，碳化矽、矽鍺、砷化銦鎵、磷化銦鎵、碲化汞鎘等等）。可選擇蝕刻液110的成分以促進期望蝕刻的半導體的蝕刻。

【0029】 現在描述與選擇性蝕刻半導體元件108相關的系統100的配置和操作有關的各種細節。蝕刻腔室102包括第一容納容器114和第二容納容器116。第一容納容器114容納蝕刻液110。容器114、116藉由密封件118(例如，O形環，其中容器114、116是環形的)接合；密封件118是防止蝕刻液110從蝕刻腔室102逸出。將半導體108定位在第二容納容器116中，使得半導體108的第一表面112暴露於蝕刻液110。

【0030】 系統100進一步包括電壓源120；電壓源120在半導體中建立電場，電場促進半導體108的表面112處的蝕刻反應。電壓源120在電壓源120的正極端子和負極端子分別被連接到陽極電極122和陰極電極124。陽極電極122經定位於第二容納容器116內，以與導電材料126接觸。將導電材料126放置為與半導體108的第二表面128(其相對於暴露於蝕刻液110的表面112)接觸。當電壓源120將電壓施加到電極122、124時，在半導體108內建立電場，該電場可用於將電荷載流子引導至半導體108內的期望位置。例如，可控制電壓源120以在半導體108內建立電場；此電場趨向使正電荷載流子(如電洞)朝蝕刻表面112遷移。

【0031】 第二容納容器116進一步包括窗口130；窗口130經定位在容器116的外表面132處並且延伸穿過表面132

以面向半導體108的背側表面128(即，與被蝕刻的表面相對的表面)。窗口130對於雷射104所發射的光束109來說是透明的。將雷射104定位成面向窗口130，且雷射104藉由窗口130朝向半導體108的背側128發射光束109。選擇或配置導電材料126對於雷射104所發射的光束109來說是透明的。作為示例而非限制，導電材料126可以是鹽水、酸、鹼、透明導電氧化物、非常薄(例如，10-50nm)的金屬膜、金屬網、石墨烯、碳奈米管及透明導電聚合物等等。在另一示例性的實施例中，導電材料126可以是弱HF溶液。當蝕刻液110包括HF時，使用HF溶液作為導電材料126可抑制蝕刻液110和導電材料126之間發生接觸時不期望的反應。系統100可進一步包括聚焦系統134(例如，其包括物鏡或客製化的光學聚焦元件)；聚焦系統134接收來自雷射104的光束109且藉由窗口130將光束109聚焦到半導體元素108內的焦斑。光束109在離開聚焦系統134之後將是焦錐；然而，為了簡化和說明的目的，光束109(在一些隨後的圖中)直到光束109到達其焦位置144前皆被示成直的光束。

【0032】 計算裝置106包括處理器136、可操作地耦合到處理器136的記憶體138，及可操作地耦合到處理器136的資料存儲140。記憶體138包括指令，當由處理器136執行指令時，指令使得處理器136執行各種功能。製程控制組件142控制用於選擇性地蝕刻半導體108的製程的各個態樣。例如，製程控制組件142控制雷射104及/或聚焦

系統134的定向和定位，及照射半導體108中的特定位置。製程控制組件142亦可經配置為控制其他蝕刻輸入變數，如光束109的強度、電壓源102所施加的偏壓和蝕刻液110的溫度等等。

【0033】 現在描述與選擇性蝕刻半導體108相關的系統100的操作。蝕刻液110對半導體108的蝕刻是基於在表面112處的原子晶格中存在電洞的情況下，在半導體108的蝕刻表面112處進行的一序列的化學反應而發生。在半導體108包括矽且蝕刻液110包括氫氟酸的示例性的實施例中，蝕刻反應為以下兩步驟的電化學反應：

【0034】 $$Si + 2F^- + 2h^+ \rightarrow SiF_2 \quad (1)$$

【0035】 $$SiF_2 + 2HF \rightarrow SiF_4 + H_2 \quad (2)$$

【0036】 在方程式1所示的化學反應中，在矽半導體的表面處帶正電的電洞促進帶負電的氟離子與中性矽之間的反應，以在表面處生成SiF_2。等式2的化學反應是蝕刻反應，其中HF蝕刻液與SiF_2反應以生成SiF_4和H_2氣體。因此，可藉由控制半導體中的電洞的數量和位置來控制方程式1和方程式2所描述的電化學蝕刻反應。在存在電洞的地方，可發生蝕刻；而在不存在電洞的地方，不發生蝕刻。已提出使用中間氧化矽步驟對矽進行矽電化學蝕刻的其他替代反應方程式。一般來說，各種提出的反應方程式和實驗結果表明需要電洞來進行蝕刻。

【0037】 在示例性的系統100中，透過雷射104照射半導體108來生成電洞。由於電洞的存在促進蝕刻液110與半導

體108的電化學蝕刻反應，故可基於雷射104對半導體108的照射來控制對半導體108的蝕刻。為了在半導體中生成電洞，必須向半導體晶格中的電子賦予足夠的能量，以允許電子從價態橋接半導體的帶隙帶到傳導帶。因此，習知上使用雷射來在半導體中生成電洞，其中每個光子的能量大於半導體的帶隙能量。

【0038】 對之，雷射104是發射光子能量小於半導體108的帶隙能量的光的雷射。子帶隙能量的光通常不會被半導體108吸收；因此，半導體108對於由雷射104所發射的光束109來說通常是透明的。聚焦系統134經配置為將光束109聚焦到半導體108中的強焦斑144。雖然通常子帶隙能量光並不會向電子賦予足夠的能量以使電子從其在半導體晶格中的位置被釋放(從而生成電洞)，但當聚焦系統134將光束聚焦到強焦斑144時，可發生MPA，由此多個光子基本上同時將能量傳遞給電子。當電子吸收多個光子（每個光子的能量低於帶隙能量）時，可賦予足夠的能量以使電子從價帶移動到傳導帶，從而生成電洞。

【0039】 作為說明，現在參考圖2，顯示在半導體的原子晶格中生成電洞的概念圖。應理解的是，雖然相關於圖2描繪和描述與電子、光子和電洞有關的某些態樣，但這些態樣僅旨在作為概念性說明以促進對內在物理過程的理解，其並不旨在作為對次原子物理過程的完全準確的描述。圖2描繪包括複數個電子e^-的半導體200的快照圖。將電子e^-限制在半導體200的價帶或半導體200的傳導帶。圖2進一步

描繪例如由雷射所發射的光束202。如圖2所示，光束202包括複數個光子*p*，其中每個光子*p*具有低於半導體200的帶隙能量的能量。

【0040】 最初，光束202在區域204中未聚焦。在未聚焦的區域204中，光束202不太可能向電子賦予足夠的能量以使電子從價帶跨越帶隙到傳導帶，因為兩個或更多個光子不太可能會同時向電子賦予能量。光束202在半導體200內的焦斑206處聚焦。在焦斑206處，光束202的通量(即，每單位面積的能量)相對於未聚焦區域204增加。因此，在焦斑206處，兩個或更多個光子將更有可能基本上同時向電子賦予能量。MPA發生在光束202的焦斑206處。例如，如圖2所示，兩個光子208、210同時到達電子212。光子208、210賦予足夠的能量以使得電子212從其在半導體200的原子晶格中的位置(如從電子212延伸的箭頭所指示)移動。相比之下，在圖2中所描繪的時間快照處，僅單個光子214到達另一個電子216。因光束202的光子*p*具有子帶隙能量，故單一光子214不足以向電子216施加足夠的能量以使電子216從其在晶格中的位置移動，故光子214不會被吸收且電子216不會離開價帶。當電子e^-離開其在半導體200的晶格中的位置時，留下帶正電的電洞h^+。例如，電子218經描繪為遠離晶格中的位置，而電洞220保留在其位置。

【0041】 再次參考圖1，透過在焦斑144處的半導體108的原子晶格中的電子，藉由光束109的子帶隙能量光的MPA

在焦斑144處生成電洞。焦斑144處所生成的「電洞」可遷移到蝕刻表面112，這導致表面112處的電洞的位置處的半導體108的氧化和隨後的蝕刻。舉例來說，半導體108包括從表面112延伸到半導體108中的蝕刻特徵146。當在焦斑144處生成的孔遷移至蝕刻特徵146的底表面148時，蝕刻液110氧化並蝕刻特徵146的底表面148，以進一步將特徵146延伸到半導體108的蝕刻主體中。

【0042】 製程控制組件142可藉由蝕刻腔室102中的蝕刻液110來控制對半導體108的電化學蝕刻的各種參數，以促進期望特徵的蝕刻。在示例中，可建立電場，且可以可變地控制電場以影響半導體108中蝕刻的特徵的尺寸或形狀。在系統100中，計算裝置106與電壓源120進行通訊，且製程控制系統142經配置為控制電壓源120的輸出。製程控制系統142可控制電壓源120，以在半導體108中建立電場。可維持電場使得電洞如上所述地被掃到蝕刻表面112。透過電壓源120在半導體108中建立電場有利於透過將電洞引導到半導體晶格中的期望位置來執行半導體108的表面112的選擇性蝕刻。半導體108內的各種(不是由於電壓源120的)內部電場對半導體108中的電洞施加力，這會導致半導體漂移。此外，電洞透過半導體108從較高濃度的區域擴散到較低濃度的區域。使用電壓源120在半導體108內建立電場可透過減少在雷射104的焦斑144處生成電洞與電洞到達表面112之間的時間，來減少其他電場

和載流子擴散對半導體108的表面112處的電洞的最終位置的影響。

【0043】 作為範例，現在參考圖3，示出描繪在兩個不同電場的影響下電洞遷移的圖。圖3示出半導體元件300；半導體元件300包括暴露於蝕刻液304的第一表面302和與第一表面302相對的第二表面306，其中子帶隙能量光的光束308通過第二表面306進入半導體300。光束308在位於半導體300內的光束308的焦斑316處生成複數個電洞310－314。電洞310－314在電場*E*的影響下向半導體300的蝕刻表面302遷移。對於電場*E*的第一強度，電洞310－314遷移到相應的位置318－322。若電場*E*增加到第二、更大的強度(例如，藉由增加系統100中的電壓源120的電壓輸出)，則電洞310－314可以更快地掃至蝕刻表面302。如圖3所示，在具有第二、更大的強度的電場的影響下，電洞310、314遷移到比位置318、322更靠近的相應的位置324、326。因此，對於給定的一組照射參數(例如，雷射焦斑的尺寸、位置和強度)，蝕刻特徵的尺寸(例如，直徑)可藉由減少電場*E*的強度來增加，或可藉由增加電場強度*E*的強度來減少。

【0044】 系統100的其他參數可由製程控制組件142結合在半導體108中的蝕刻期望特徵來控制。在示例性的實施例中，製程控制組件142向雷射104及/或聚焦系統134輸出控制訊號，其使得雷射104及/或聚焦系統134調整半導

體108內的焦斑144的尺寸、強度或定位，從而影響所得蝕刻。

【0045】 作為範例，現在參考圖4，示出描繪對於焦斑的各種尺寸和位置的半導體內的電洞遷移的差異的圖。圖4示出半導體元件400；半導體元件400包括暴露於蝕刻液404的第一表面402和與第一表面402相對的第二背側表面406，其中子帶隙能量光的光束408－412經示出為穿過背側表面406進入半導體400。光束408－412中的每一者具有焦斑尺寸和相對於蝕刻表面402的位置的不同組合。光束408具有焦斑414，其焦斑寬度fw_1位於距蝕刻表面402的深度d_1處。電洞416、418經描繪為最初在焦斑414處間隔開最大距離fw_1。由於載流子擴散、內部或感應電場、或其他各種力，電洞416、418遷移至半導體400的蝕刻表面402處的位置420、422。將位置420、422定位成相隔寬度w_1，其中w_1的值取決於本文所述的各種蝕刻參數。類似地，光束410具有焦斑424。光束410的焦斑424具有與第一光束408的焦斑414相同的焦斑寬度fw_1，但焦斑424位於比第一焦斑414的深度d_1更淺的深度d_2處。作為結果，在其他條件相同的情況下，在焦斑424處以最大距離fw_1生成的電洞426、428會遷移到蝕刻表面420處的相應的第二位置430、432，其間隔開的寬度w_2小於寬度w_1。對於相同尺寸的焦斑，可藉由增加焦斑與蝕刻表面之間的距離來增加半導體的蝕刻表面處的蝕刻特徵的尺寸。

【0046】 焦斑的寬度也可影響所得蝕刻特徵的寬度。仍參考圖4，第三光束412具有位於與第二光束410的焦斑424相同的深度d_2處的焦斑434。第三光束412的焦斑434進一步具有大於第二光束410的焦斑寬度fw_1的焦斑寬度fw_2。電洞436、438經描繪為焦斑434處以相距fw_2的最大距離生成。電洞436、438經示出為遷移到在蝕刻表面402處的相應的第二位置440、442，第二位置440、442間隔開寬度w_3。寬度w_3大於寬度w_2，這表示在其他條件相同的情況下，焦斑寬度fw_2越大，所生成的蝕刻特徵寬度w_3越大。

【0047】 可進一步相對於半導體108中現有蝕刻特徵的位置來進一步控制雷射104的焦斑144的位置，以影響蝕刻特徵的最終尺寸或形狀。例如，可將焦斑144定位成緊鄰半導體108中的蝕刻特徵的表面(例如，在特徵的表面的10奈米內到特徵的表面的10至200微米內，或更多地取決於特定半導體的載流子擴散長度)，使得由蝕刻特徵的幾何形狀所建立的內部電場改變在焦斑144處生成的電洞的運動。在非限制性示例中，現在參考圖5，示出半導體500的示例性蝕刻的圖，其中在緊鄰現有蝕刻特徵處生成電洞以減小蝕刻的尺寸。半導體包括前側表面502和背側表面506；前側表面502暴露於蝕刻液504而子帶隙能量光束508通過背側表面506進入半導體500。半導體500包括在半導體500的表面502中蝕刻的特徵510。特徵510在表面502處具有初始寬度w_i。在示例性的實施例中，初始寬度w_i基於光束508的焦斑512的寬度、在半導體500中的感應電場E

的強度，及表面502和焦斑512的位置之間的載流子濃度的相對差異等等。當特徵510延伸到半導體500中時，由於電荷載流子在特徵510的尖端514處的電場聚焦，特徵510的寬度逐漸減小到更小的最終寬度w_f。

【0048】 作為說明，在光束508的焦斑512處生成複數個電洞516－520。在感應電場E的影響下，電洞516－520從光束508的焦斑512朝向半導體500的蝕刻表面502遷移。在不存在現有特徵的情況下，表面502處的蝕刻特徵的最小寬度可能受到光束508的焦斑尺寸的限制。例如，結合最初在半導體500的表面502處蝕刻特徵510，初始寬度w_i可以是焦斑512的寬度。當將特徵510蝕刻到半導體中時，特徵510的表面(例如，內表面522、524)導致電場線（未示出）從表面506向特徵510彎曲，特別是向特徵510的尖端514彎曲。電場的此種變化是由於當電洞遷移穿過半導體500時，特徵510在電洞上施加力。因此，朝向特徵510的尖端514，在光束508的焦斑512處所生成的電洞516－520被吸引至寬度w_f內的位置526－530。儘管沒有特徵510，電洞516－520可在電洞516－520朝向表面502遷移時而間隔開(例如，由於半導體500中的電荷載流子擴散)，而特徵510的表面則會將電洞吸引到它們身邊。

【0049】 在示例性的實施例中，特徵510的最終寬度w_f小於焦斑512的寬度。因此，再次參考圖1，藉由將雷射104的焦斑144放置在半導體108中的蝕刻特徵附近，可在半導體108中蝕刻具有比雷射104和聚焦系統134的解析度極

限更小的尺寸的特徵。在一個說明性的示例中，如果雷射104具有500奈米的最小焦斑尺寸，則製程控制組件142可控制雷射104，以利用電場聚焦蝕刻尺寸小至10奈米的特徵。

【0050】 由於除了雷射104的焦斑144處之外，子帶隙能量光不被半導體108吸收，因此可將焦斑144定位在半導體108的三維主體內的任何地方。這使得能夠在不需要直接直線通往半導體108的蝕刻表面112的路徑的情況下(通常在基於光罩的傳統蝕刻下，這是需要的)來蝕刻半導體108內的三維特徵。

【0051】 例如，現在參考圖6，示出半導體600的示例性蝕刻，其中空腔602形成在半導體600的主體內。如圖6所示，半導體600包括前側表面604和背側表面608；前側表面604暴露於蝕刻液606而子帶隙能量光束610通過背側表面608進入半導體600。將空腔602設置在半導體600的主體內，而不是形成在半導體600的表面上。由於半導體600除了在光束610的焦斑612處之外對於光束608是透明的，所以可將焦斑612定位成在半導體600的主體內的任何地方生成電洞。與蝕刻空腔602相關，在蝕刻空腔602之前，蝕刻額外的通道特徵614、616。雖然可藉由使用光束608來控制半導體600中的電洞的生成來控制蝕刻液606的蝕刻位置，以便對於要蝕刻的特徵，蝕刻液606必須能夠到達該特徵。因此，從前側表面604將第一通道特徵614蝕刻到半導體600的主體。因為蝕刻液606藉由第一通

道特徵614能夠到達第二通道特徵616，故在第一通道部件614之後蝕刻第二通道部件616。隨後，因為蝕刻液606能夠藉由先前蝕刻的通道特徵614、616到達空腔602，故可蝕刻空腔602。

【0052】 應理解的是，雖然為了便於理解，在附圖中以二維形式描繪與蝕刻特徵相關的各個態樣，但本文所描述的技術適合於在三個維度上蝕刻基本上任何形狀的特徵。現在參考圖7，示出圖6所示的蝕刻特徵602、614、616的三維表示700。在三維表示700中，將半導體600示出為具有長方體形狀。第一通道特徵614是矩形通道特徵，其從前側表面604延伸到半導體600的主體中。第二通道特徵616也是矩形通道特徵，且從半導體600的主體中的第一通道特徵614水平向外延伸。將空腔602顯示為與第二通道特徵616連接的立方體空腔，且由此藉由兩個通道特徵614、616連接到半導體600的前側表面604。

【0053】 再次參考圖1，製程控制組件142可進一步控制蝕刻液110的溫度和成分，以維持期望的蝕刻參數。系統100進一步包括與計算裝置106通訊的成分控制器150和溫度控制器152。成分控制器150透過容納容器114中的開口154而經耦合到第一容納容器114的內部。可由製程控制組件142控制成分控制器150，以從第一容納容器114去除蝕刻反應的副產物及/或引入額外的蝕刻液，以維持容納容器114內的蝕刻液110的目標成分。將溫度控制器152耦合到位於容納容器114內的加熱/冷卻裝置156。回應於從計算

裝置106接收控制訊號，溫度控制器152控制加熱/冷卻裝置156，以加熱或冷卻容納容器114中的蝕刻液110，以便維持蝕刻液110的目標溫度(例如，如由計算裝置106傳送到溫度控制器152的控制訊號中所指示的)。

【0054】 應理解，本文所述的各種力、參數和變數中的任何一者或全部皆可影響半導體108內的電洞的遷移。因此，在一個位置處所生成的電洞可遷移到另一個位置，這取決於大量的可變物理參數(例如，溫度、電極122、124之間的電壓、焦斑144的尺寸、強度和位置和半導體108的成分等等)。為了促進根據期望的蝕刻圖案來蝕刻半導體108，記憶體138包括蝕刻建模組件158；蝕刻建模組件158基於輸入到計算裝置106的蝕刻定義來將蝕刻控制指令輸出到製程控制組件142。此外，可透過監測電化學蝕刻單元中流動的電流*I*（其與蝕刻發生的速率有關）、監測蝕刻液110的當前溫度、監測(例如，如由成分控制器150所識別的)由蝕刻過程生成的產物或隨著蝕刻進行而監測蝕刻前緣的圖像，來將反饋引入至控制演算法中。

【0055】 現在描述與根據期望圖案蝕刻半導體108相關的蝕刻建模部件158和製程控制組件142的示例性操作。將蝕刻定義提供給蝕刻建模組件158，其中蝕刻定義指示半導體108中期望蝕刻的各種特徵的位置和尺寸。換句話說，蝕刻定義指示(例如，系統100的操作員)期望的半導體108要被蝕刻的複數個位置，其中複數個位置合在一起限定了被要蝕刻的一個或多個特徵的結構。在示例性的實施例

中，蝕刻定義包括電腦輔助設計(CAD)文件，其指示半導體的尺寸和半導體中的一個或多個蝕刻特徵的相應的位置和尺寸。輸入到蝕刻建模組件158的蝕刻定義可進一步包括一個或多個期望的蝕刻參數。作為示例而非限制，蝕刻定義可包括指示半導體108的成分、半導體108中現有蝕刻特徵的位置、雷射104及/或電壓源120的期望操作參數等等的資料。

【0056】 蝕刻建模組件158經配置為基於蝕刻定義，將蝕刻控制指令輸出到製程控制組件142。蝕刻控制指令定義系統100的各個態樣的控制參數；此等控制參數由製程控制組件142結合執行蝕刻定義中所描述的期望蝕刻而使用。在示例性的實施例中，蝕刻控制指令包括雷射104的焦斑144的複數個位置。在其他示例中，蝕刻控制指令可包括指示蝕刻液110的成分、蝕刻液110的溫度和電壓源120的電壓輸出等等的資料。

【0057】 在示例性的系統100中，將光束109發射到半導體108的背側表面128中，以避免光束109被半導體108中的已蝕刻的特徵(如特徵146)散射。通常可藉由從背側128用雷射104照射半導體108及在蝕刻遠離蝕刻表面112的特徵之前先蝕刻最接近蝕刻表面112的特徵，來避免光束109藉由半導體108中的蝕刻特徵的散射。然而，對於更複雜的三維結構來說，可能需要以不同的順序來蝕刻特徵，以避免光束109的散射。蝕刻建模組件158可經配置為生成

蝕刻控制指令，以最小化光束109穿過半導體108中已蝕刻特徵上的情況。

【0058】 在示例性的實施例中，蝕刻建模組件158基於物理模型160生成蝕刻控制指令；物理模型160經配置為輸出半導體108內的電洞遷移的預測。在示例中，將期望的蝕刻位置提供給(例如，如提供給蝕刻建模組件158的蝕刻定義中所指示的)物理模型160，且物理模型160輸出包括照射位置的預測，其中預測指示在照射位置處生成的電洞預計會遷移到所需的蝕刻位置。換句話說，物理模型160接收半導體108的期望蝕刻的位置，並輸出雷射104的焦斑144可定位在哪裡以生成期望的蝕刻的預測。

【0059】 物理模型160基於影響半導體108中的電洞運動的各種參數，來生成期望蝕刻位置的照射位置預測。此種的物理效應包括但不限於電荷載流子擴散、(例如，由在電極122、124之間建立的電壓所引起的)半導體108內的感應電場，及流經包括導電材料126、半導體108、蝕刻液110、電極122、124和電壓源120等等的電化學單元的電流*I*。結合生成照射位置預測，物理模型160可基於可能影響建模的物理製程的其他基礎資料，來進一步對由於這些參數造成的效應進行建模。例如，物理模型160可基於半導體108的成分和半導體108中的摻雜劑或其他雜質的濃度，來對電荷載流子擴散的效應建模。在另一個示例中，物理模型160可基於施加在電極122、124之間的電壓，來對感應電場的效應建模。

【0060】 除了接收與期望的蝕刻參數(例如，如提交給蝕刻建模組件158的蝕刻定義中所指定的)有關的資料之外，物理模型160還接收與系統100的一個或多個操作參數的當前狀態有關的資料。例如，製程控制組件142可即時輸出資料到物理模型160；該資料指示電流*I*，該電流*I*指示蝕刻反應的反應速率(例如，上文方程式1和2所描述的反應)。因此，物理模型160可基於與系統100的當前狀態相關的資料，來連續地生成用於期望蝕刻的特徵的照射位置的更新的預測。蝕刻建模組件158可基於預測來生成更新的控制指令，並將更新的控制指令傳送到過程控制元件142，以促進過程控制元件142基於關於系統狀態的最新資訊來控制系統100。

【0061】 在其他示例性的實施例中，物理模型160可經配置為基於儲存在資料存儲140中的模擬結果162，來生成照射位置預測。在實施例中，模擬結果162包括大量的(例如數百或數千或更多個)根據各種蝕刻參數對半導體進行的模擬蝕刻的結果。物理模型160可經配置為對模擬結果162執行機器學習演算法，以識別模擬蝕刻的結果；此等模擬蝕刻的結果表現出與蝕刻建模組件158所接收的蝕刻定義中所指示的期望蝕刻類似的蝕刻圖案。物理模型160接著可基於所識別的結果，輸出照射位置預測。

【0062】 雖然本文描述由物理模型160建模的物理效應的某些示例，但可預期的是，物理模型160可對能夠影響由

雷射104的焦斑144在照射位置所生成的電洞的最終蝕刻位置的基本上任何物理製程進行建模。

【0063】 應理解，用於各種半導體的選擇性電化學蝕刻的系統和方法適合於蝕刻各種尺寸的特徵。例如，根據本文所述的技術，可蝕刻出尺寸為大約10奈米至1微米、大約10微米至1毫米或任意大尺寸的特徵。

【0064】 雖然上文詳細描述關於可結合半導體的選擇性蝕刻操作的示例性的系統100的各個態樣，但應當理解的是，其他配置是可能的且被設想在在本申請案的範圍內。現在參考圖8，示出另一個示例性的系統800，其中半導體108包括在蝕刻腔室802中，且蝕刻腔室802經配置成由複數個子帶隙能量雷射804－808進行正面照射。蝕刻腔室802包括容納蝕刻液110的第一容納容器810，及容納半導體108和導電元件814的第二容納容器812。第一容納容器810進一步包括窗口816；由各個聚焦系統824－828將藉由窗口816的各個雷射804－808所發出的光束818－822朝向半導體108的前側蝕刻表面112聚焦。應當理解，當朝向半導體108的前側表面112發射光束818－822時，可將光束818－822聚焦到半導體108的主體內和表面112下方的相應焦斑。在示例性的系統800中，電壓源120連接在導電元件814與電極830之間；導電元件814與半導體108的背側128電接觸，且電極830經定位在第一容納容器810中。

【0065】 計算裝置106的製程控制組件142可經配置成獨立地控制複數個雷射804－808，以便於促進半導體108的更快蝕刻。例如，由於透過蝕刻液110蝕刻半導體108是由促進蝕刻反應的電洞驅動，故由雷射804－808在半導體108的多個位置處同時生成電洞使得能夠同時蝕刻多個特徵。應理解，可將基本上任意數量的雷射包括在用於半導體的選擇性電化學蝕刻的系統中，並由製程控制組件142控制此等基本上任意數量的雷射。在其他示例中，可能期望製程控制組件142控制複數個雷射以平行操作，使得可在半導體108中同時蝕刻複數次相同特徵。

【0066】 在一些實施例中，系統100可包括多個雷射104、164、166，以促進在多個位置平行蝕刻半導體108。雷射164、166可有相應的聚焦系統168、170。雷射164、166發射相應的光束172、174。多個光束109、172、174透過MPA同時在半導體108內的多個位置中激發電荷載流子。當這些受激載流子遷移到半導體108的表面112時，蝕刻劑溶液110與半導體108之被載流子氧化的部分反應，引起半導體108在多個位置的蝕刻。然而，光束109、172、174在半導體108內的重疊可導致在半導體108內的非預期位置處生成電荷載流子。這些非預期電荷載流子遷移到半導體108的表面112又會導致半導體108在不期望位置的蝕刻。

【0067】 作為說明，現在參考圖9，示出半導體元件902的截面圖900，其中第一雷射光束904和第二雷射光束906

在半導體902內重疊。第一雷射光束904具有焦斑908；在焦斑908處經由MPA生成電洞910。第二雷射光束906具有焦斑912；在焦斑912處經由MPA生成電洞914。這些電洞910、914遷移到暴露於蝕刻劑溶液922的半導體902的表面920處之相應的蝕刻位置916、918。

【0068】 雷射光束904、906在半導體902的主體內的區域924內重疊。然而，除了在光束904、906的各自的焦斑908、912處之外，光束904、906各自可能不具有足夠的強度來藉由MPA生成電荷載流子；在區域924內，光束904、906的重疊可為MPA的發生提供足夠的強度。因此，儘管可能期望僅在焦斑908、912附近生成載流子(例如，電洞)，但也可在光束904、906的重疊的區域924中生成電洞926。此電洞926可遷移到半導體902的表面920處的蝕刻位置928，從而導致在非預期位置處蝕刻半導體902。

【0069】 為了避免在半導體108的主體內生成非預期的電荷載流子，製程控制組件142可經配置為控制雷射104、164、166，使得光束109、172、174不在半導體108內重疊。在示例性實施例中，製程控制組件142接收蝕刻定義(例如，作為計算裝置106的輸入)；蝕刻定義是定義期望蝕刻到半導體108中的特徵的位置。製程控制組件142可基於蝕刻定義來生成蝕刻指令，其中蝕刻指令指示雷射104、164、166中的每一者的照射位置。雷射104、164、166的照射位置經配置成使得由雷射104、164、166所生成的電荷載流子共同引起由蝕刻定義所指定的全部特徵的

蝕刻(藉由蝕刻劑溶液110)。製程控制組件142可生成蝕刻指令，使得光束109、172、174同時照射半導體108而不重疊。例如，蝕刻指令可指定第一雷射104照射半導體108的第一區域中的位置，且第二雷射164照射半導體108的與第一區域不重疊的第二區域中的位置。

【0070】 在另一個示例中，製程控制組件142可經配置為基於光束109、172、174的幾何形狀來控制雷射104、164、166。例如，製程控制組件142可控制雷射104、164、166來使得光束109、172、174瞄準由至少與半導體108內的光束109、172、174的最大寬度一樣大的距離隔開的位置。在非限制性的說明性示例中，光束109可以是在半導體108內最大寬度為x_1的光束109、172、174中最寬的一者。製程控制組件142可經配置成使得其他光束172、174都不能同時照射在光束109的距離x_1內的任何位置。半導體108內的光束109、172、174的相應寬度可取決於半導體108內的光束109、172、174的相應焦斑的深度。一般而言，相較於在半導體108中較淺深度處具有類似幾何形狀的光束，在半導體108中具有較大深度的光束(即，具有更靠近半導體的前側表面112的焦斑)將在整個半導體108上具有更大的寬度。

【0071】 然而，在一些實施例中，系統100包括多個雷射104、164、166；多個雷射104、164、166同時照射半導體108以促進同時蝕刻半導體108中的多個特徵；在一些實施例中，可採用單個雷射(例如，雷射104)以生成電荷

載流子(例如，電洞)；此等電荷載流子(例如，電洞)可用於促進在多個位置同時蝕刻半導體108。舉例來說，製程控制組件142可經配置為根據蝕刻定義來控制雷射104，使得在半導體108中同時蝕刻複數個特徵。由雷射104激發的電荷載流子群體在半導體108中持續存在，其壽命可取決於半導體108的構成。因此，在光束109透過MPA激發電荷載流子之後，電荷載流子可在關閉光束109後在半導體108中持續存在。藉由順序地照射半導體108中的複數個照射位置，且重複序列直到完成多個蝕刻位置處的蝕刻，可使用單個雷射104來控制半導體108中的多個蝕刻位置的平行蝕刻。

【0072】 在示例性的實施例中，雷射104是脈衝雷射。聚焦系統134可經配置成將雷射104的焦斑144順序地移動到與相應的(例如，由蝕刻定義所定義的)複數個蝕刻位置相關聯的複數個照射位置。在非限制性的示例中，現在參考圖10，示出半導體元件1002的示例性的表面1000，其上示出複數個照射位置1004－1008。聚焦系統134可在第一時間處將焦斑144移動到第一照射位置1004、在第二時間處將焦斑144移動到第二照射位置1006，並在第三時間處將焦斑144移動到第三照射位置1008。當焦斑144位於第一照射位置1004時，光束109的第一脈衝在第一照射位置1004附近的半導體1002內生成電荷載流子。當焦斑144移動到第二照射位置1006時，光束109的第二脈衝在第二照射位置1006附近的半導體1002生成電荷載流子。

然而，假設脈衝之間的時間小於半導體1002中的電荷載流子的壽命，一些電荷載流子保持在第一照射位置1004附近，且可用於允許在對應於第一照射位置1004的蝕刻位置處蝕刻半導體1002。類似地，當焦斑144移動到第三照射位置1008時，光束109的第三脈衝在第三照射位置1008附近生成電荷載流子。同樣，一些電荷載流子保持在第一照射位置1004和第二照射位置1008中的每一者的附近。因此，在三個照射位置1004－1008處保持電荷載流子可用於允許半導體的蝕刻在雷射104從照射位置1004－1008移動之後在對應於照射位置1004－1008的蝕刻位置中繼續進行一段時間。

【0073】 再次參考圖1，一旦焦斑144照射一序列的照射位置中的最終照射位置，製程控制組件142便可控制雷射及/或聚焦系統134以再次開始此序列。換句話說，製程控制組件142控制雷射104重複照射一序列的照射位置。應理解，在一些實施例中，照射位置序列中的照射位置可隨時間改變(即，在序列的後續迭代中)，以促進半導體108中的非垂直特徵的蝕刻。

【0074】 可由單一雷射104支援的平行蝕刻位置的數量可取決於半導體108中的電荷載流子的壽命、雷射104的脈衝重複頻率、及/或在雷射104的單一脈衝期間在半導體108中生成的電荷載流子的數量。雷射104的脈衝重複頻率可以是雷射104的固有屬性。在其他實施例中，可控制雷射104的脈衝重複頻率。在這樣的實施例中，可根據所需數

量的平行蝕刻位置來選擇雷射104的脈衝重複頻率。在各種實施例中，雷射104的脈衝重複頻率可大於或等於250kHz、大於或等於1MHz、大於或等於10MHz，或大於或等於100MHz。

【0075】 結合使用單一雷射104來控制半導體108的蝕刻，聚焦系統134可包括可(例如，由製程控制組件142)控制以將光束109的焦斑144從一個照射位置移動到下一個照射位置的各種組件。這些組件可包括微鏡、電光偏轉器和定位測角器等等。在一些實施例中，根據雷射104的期望脈衝重複頻率來選擇聚焦系統134的部件。作為示例而非限制，可選擇聚焦系統134的部件，使得聚焦系統134能夠在由雷射104的脈衝重複頻率所決定的脈衝之間的時間內，改變雷射104的焦斑144的位置。

【0076】 在一些實施例中，上文關於單一雷射104所描述的脈衝序列重複可與包括多個雷射的系統一起使用。舉例來說，製程控制組件142可經配置為控制雷射104、164、166和聚焦系統134、168、170，使得雷射104、164、166中的每一者隨著時間重複地照射相應的照射位置序列。在這些實施例中，製程控制組件142可控制多個雷射104、164、166和聚焦系統134、168、170，使得在序列的每個階段，沒有任何雷射104、164、166會在半導體108內重疊。

【0077】 在一些實施例中，聚焦系統134、168、170可經配置為採用光學色散來在光束109、172、174到達其各自

的焦斑之前，降低半導體108的主體內的光束109、172、174的瞬時強度。舉例來說，雷射104、164、166可以是生成超短脈衝的皮秒雷射或飛秒雷射。此類雷射的特點是寬頻光輸出光譜。聚焦系統134、168、170經配置為暫時擴展和再壓縮由雷射104、164、166所輸出的脈衝。作為示例，現在參考圖11，示例性的聚焦系統1100。聚焦系統1100包括色散元件1102和物鏡1104。色散元件1102接收來自雷射1106的光脈衝，並將此脈衝引導到物鏡1104。物鏡1104接著將脈衝聚焦到半導體1110內的焦斑1108。在示例性的實施例中，色散元件1102可以是或包括各種繞射光柵中的任何一者；各種繞射光柵如微鏡陣列和閃耀光柵等等。色散元件1102經配置為呈現光學色散效應；此光學色散效應在時間上擴展從雷射1106接收到的光脈衝。光脈衝的時間擴展導致脈衝的瞬時強度減少。物鏡1104表現出負色散效應，使得在脈衝向焦斑1108傳播時暫時壓縮由色散元件1102所暫時擴展的光脈衝。脈衝在焦斑1108處達到峰值強度。在雷射1106的輸出處，脈衝可足夠強以可靠地在半導體1110中引起MPA。色散元件1102可經配置為使得時間擴展導致脈衝的強度太低而不太可能在到達焦斑1108之前引起MPA。因此，再次參考圖1，聚焦系統134、168、170可包括類似於關於圖11所描述的色散元件。由於光束109、172、174的時間擴展導致聚焦系統134、168、170輸出的脈衝光束109、172、174的強度降低，因此光束109、172、174的重疊區域的

光強度仍不足在半導體108的主體內頻繁產生MPA。因此，在聚焦系統134、168、170中包括色散元件，可將MPA限制在光束109、172、174的相應焦斑附近的區域。

【0078】 圖12示出與由半導體的子帶隙能量照射驅動的選擇性半導體蝕刻相關的示例性的方法1200。雖然將方法示出和描述成按順序執行的一序列動作，但應當理解和認識到的是，方法並不受序列的順序限制。例如，一些動作可用與本文所描述的順序不同的順序發生。此外，一個行為可與另一個行為同時發生。此外，在某些情況下，實現本文所描述的方法可能不需要所有的動作。

【0079】 此外，本文所述的動作可以是可由一個或多個處理器實現及/或儲存在一個或多個電腦可讀取媒體上的電腦可執行指令。電腦可執行指令可包括常式、子常式、程式、執行緒，及/或諸如此類。此外，可將方法的動作結果儲存在電腦可讀取媒體中、顯示在顯示裝置上，及/或諸如此類。

【0080】 方法1200有利於藉由半導體的子帶隙能量照射來選擇性蝕刻半導體。方法1200開始於1202，且在1204處，在半導體的第一表面和半導體的第二表面之間施加電壓。舉例來說，可藉由在浸沒在分別與半導體的第一表面和第二表面接觸的導電溶液中的電極(例如，在示例性的系統100中所示出的電極122、124)之間施加電壓，來在第一表面和第二表面之間施加電壓。在1206處，透過雷射在第一位置處照射半導體，其中雷射發射能量低於半導體的

帶隙能量的光。將雷射聚焦到足夠強的焦斑，以導致在半導體中的第一位置處生成電洞，其中基於在第一位置處生成的電洞，半導體的蝕刻發生在第二位置處。方法接著在1208處結束。

【0081】 現在參考圖13，示出可根據本文所揭露的系統和方法所使用的示例性的計算裝置1300的高階圖示。例如，計算裝置1300可用在控制用於選擇性半導體蝕刻的系統(例如，系統100、系統800)的操作的系統中。另一個示例中，計算裝置1300可用於基於實體模型執行半導體內電荷載流子遷移的模擬的系統中。計算裝置1300包括至少一個處理器1302，其執行儲存在記憶體1304中的指令。指令可以是例如用於實施經描述為由上文所討論的一個或多個組件執行的功能的指令，或用於實施上文所描述的方法的指令。處理器1302可透過系統匯流排1306存取記憶體1304。除了儲存可執行指令之外，記憶體1304亦可儲存選擇性蝕刻系統的模擬結果、蝕刻定義和各種製程參數的狀態等等。

【0082】 計算裝置1300另外包括可由處理器1302透過系統匯流排1306存取的資料存儲1308。資料存儲1308可包括可執行指令和模擬結果等等。計算裝置1300也包括輸入介面1310；輸入介面1310允許外部裝置與計算裝置1300通訊。例如，輸入介面1310可用於從外部電腦裝置、從使用者等等接收指令。計算裝置1300也包括輸出介面1312；輸出介面1312將計算裝置1300與一個或多個外部

裝置接合。例如，計算裝置1300可透過輸出介面1312顯示文字和圖像等等。

【0083】 可預期的是，經由輸入介面1310和輸出介面1312與計算裝置1300通訊的外部裝置可被納入至提供使用者可與之互動的基本上任何類型的使用者介面的環境中使用者介面類型的範例包括圖形使用者介面和自然使用者介面等等。例如，圖形使用者介面可接受使用(多個)輸入裝置(如鍵盤、滑鼠、遙控器或諸如此類)的使用者的輸入，並在輸出裝置(如顯示器)上提供輸出。此外，自然使用者介面可使得使用者能夠以不受輸入裝置(如鍵盤、滑鼠、遙控器及諸如此類)強加的約束的方式來與計算裝置1300互動。相反，自然使用者介面可依賴語音辨識、觸控和手寫筆辨識、螢幕上和螢幕附近的手勢辨識、空中手勢、頭部和眼睛追蹤、聲音和語音、視覺、觸控、手勢和機器智慧等等。

【0084】 另外，雖然將計算裝置1300顯示為單一系統，但應理解的是，計算裝置1300可以是分散式系統。因此，例如，多個裝置可透過網路連接進行通訊，且可共同執行經描述為由計算裝置1300執行的任務。

【0085】 可用硬體、軟體或其任何組合來實施本文所述的各種功能。若以軟體實施，則可將功能作為電腦可讀取媒體上的一個或多個指令或程式碼來儲存或傳輸。電腦可讀取媒體包括電腦可讀取儲存媒體。電腦可讀取儲存媒體可以是能由電腦存取的任何可用的儲存媒體。作為示例而非

限制，此種電腦可讀取儲存媒體可包括RAM、ROM、EEPROM、CD-ROM或其他光碟儲存、磁碟儲存或其他磁儲存裝置，或可用於以指令或資料結構的形式攜帶或儲存所需的程式碼且可由電腦存取的任何其它媒體。本文所使用的盤(disk)或碟(disc)包括壓縮碟(CD)、雷射碟、光碟、數位多功能碟片(DVD)、軟式磁盤和藍光碟(BD)，其中盤通常以磁方式再現資料，而碟通常以雷射光學地再現資料。此外，傳播的訊號不包括在電腦可讀取儲存媒體的範圍內。電腦可讀取媒體亦包括通訊媒體；通訊媒體包括有助於將電腦程式從一個地方傳送到另一個地方的任何媒體。例如，連接可以是通訊媒體。例如，若使用同軸電纜、光纖電纜、雙絞線、數位用戶線路（DSL）或無線技術（如紅外線、無線電和微波）從網站、伺服器或其他遠端來源來傳輸軟體，則同軸電纜、光纖電纜、雙絞線、DSL或如紅外線、無線電和微波等無線技術都包括在通訊媒體的定義中。上述的組合也應包括在電腦可讀取媒體的範圍內。

【0086】　替代地或附加地，可至少部分地由一個或多個硬體邏輯元件來執行本文所描述的功能。例如但不限於，可使用的硬體邏輯元件的說明類型包括現場可程式化閘陣列(FPGA)、程式專用積體電路(ASIC)、程式專用標準產品(ASSP)、系統單晶片系統（SOC）和複雜可程式邏輯元件（CPLD）等等。

【0087】 上文已描述的內容包括一個或多個實施例的示例。當然，為了描述上述態樣的目的，不可能描述上述裝置或方法的每一種可想到的修改和改變，但所屬技術領域中具有通常知識者可認識到，各個態樣的許多進一步的修改和排列是可能的。因此，所描述的態樣旨在涵蓋落入所附申請專利範圍的精神和範疇內的所有此類改變、修改和變化。此外，如果在[實施方式]或請求項中使用術語「包括(include)」，則此術語旨在以類似於術語「包括(comprise)」的方式為包含性，因為「包括(comprise)」在用作請求項轉折語時被解釋為包含性。

【符號說明】

【0088】

100:系統

102:蝕刻腔室

104:雷射

106:計算裝置

108:半導體元件

109:光束

110:蝕刻液

112:第一表面

114:第一容納容器

116:第二容納容器

118:密封件

120:電壓源

122：陽極電極

124：陰極電極

126：導電材料

128：第二表面

130：窗口

132：外表面

134：聚焦系統

136：處理器

138：記憶體

140：資料存儲

142：製程控制組件

144：焦位置

146：蝕刻特徵

148：底表面

150：成分控制器

152：溫度控制器

154：開口

156：加熱/冷卻裝置

158：蝕刻建模組件

160：物理模型

162：模擬結果

164：雷射

166：雷射

168：聚焦系統

170：聚焦系統

172：光束

174：光束

200：半導體

202：光束

204：未聚焦區域

206：焦斑

208：光子

210：光子

212：電子

214：光子

216：電子

218：電子

220：電洞

300：半導體元件

302：第一表面

304：蝕刻液

306：第二表面

308：光束

310~314：電洞

316：焦斑

318~326：位置

400：半導體元件

402：第一表面

404：蝕刻液

406：第二背側表面

408~412：光束

414：焦斑

416：電洞

418：電洞

420：位置

422：位置

424：焦斑

426：電洞

428：電洞

430：第二位置

432：第二位置

434：焦斑

436：電洞

438：電洞

440：第二位置

442：第二位置

500：半導體

502：前側表面

504：蝕刻液

506：背側表面

508：子帶隙能量光束

510：特徵

512：焦斑

514：尖端

516~520：電洞

522：內表面

524：內表面

526~530：位置

600：半導體

602：空腔

604：前側表面

606：蝕刻液

608：背側表面

610：子帶隙能量光束

612：焦斑

614：通道特徵

616：通道特徵

700：三維表示

800：系統

802：蝕刻腔室

804~808：子帶隙能量雷射

810：第一容納容器

812：第二容納容器

814：導電元件

816：窗口

818~822：光束

824~828：聚焦系統

830：電極

900：截面圖

902：半導體元件

904：第一雷射光束

906：第二雷射光束

908：焦斑

910：電洞

912：焦斑

914：電洞

916：蝕刻位置

918：蝕刻位置

920：表面

922：蝕刻劑溶液

924：區域

926：電洞

928：蝕刻位置

1000：表面

1002：半導體元件

1004：第一照射位置

1006：第二照射位置

1008：第三照射位置

1100：聚焦系統

1102：色散元件

1104:物鏡

1106:雷射

1108:焦斑

1110:半導體

1200:方法

1202~1208:步驟

1300:計算裝置

1302:處理器

1304:記憶體

1306:系統匯流排

1308:資料存儲

1310:輸入介面

1312:輸出介面

【生物材料寄存】

國內寄存資訊(請依寄存機構、日期、號碼順序註記)

無

國外寄存資訊(請依寄存國家、機構、日期、號碼順序註記)

無

【發明申請專利範圍】

【請求項1】 一種系統，包括：

一雷射；及

一計算裝置，該計算裝置與該雷射通訊並控制該雷射的操作，其中該雷射向一半導體發射光，其中該光在該半導體內具有一焦點，其中該光的光子能量小於該半導體的帶隙能量，且進一步其中基於該雷射所發射的該光來蝕刻該半導體。

【請求項2】 如請求項1所述的系統，進一步包括一聚焦系統，該聚焦系統聚焦由該雷射所發射的該光，使得該光在該半導體內具有該焦點。

【請求項3】 如請求項1所述的系統，進一步包括一蝕刻腔室，該蝕刻腔室包括該半導體和一蝕刻液，其中該半導體的一表面暴露於該蝕刻液，且進一步其中該蝕刻液在於該半導體的一原子晶格中存在電洞的位置處氧化並蝕刻該半導體。

【請求項4】 如請求項3所述的系統，其中該半導體包括矽、碳、鍺、鑽石、砷化鎵、砷化銦鎵、磷化銦、磷化銦鎵、氮化鎵、氮化銦鎵、氧化鋅、碲化鎘、碲化汞鎘、碳化矽或矽鍺中的至少一者。

【請求項5】 如請求項3所述的系統，其中該蝕刻液包括氫氟酸、氫氧化銨、氟化銨、氫氧化鈉、乙醇、二甲基甲醯胺、乙酸、硫酸、丙酸、高氯酸、硫酸鉀、過二硫酸鹽或乙腈中的至少一者。

【請求項6】 如請求項3所述的系統，其中該蝕刻腔室包括：

一第一容納容器；及

一第二容納容器，其中該第一容納容器保留該蝕刻液且該半導體位於該第二容納容器中，且進一步其中該第一容納容器和該第二容納容器藉由一密封件接合，該密封件防止該蝕刻液逸出該蝕刻腔室。

【請求項7】 如請求項1所述的系統，進一步包括一電壓源，該電壓源向電極施加一電壓以在該半導體內建立一電場，其中基於該半導體內的該電場來蝕刻該半導體。

【請求項8】 如請求項1所述的系統，其中基於該雷射所發射的該光來蝕刻該半導體的一內部區域。

【請求項9】 如請求項1所述的系統，進一步包括一第二雷射，其中該計算裝置與該第二雷射通訊並控制該第二雷射，其中該第二雷射向該半導體發射第二光，同時該雷射向該半導體發射光，該第二光在該半導體內具有一第二焦點，其中該第二光的光子能量小於該半導體的該帶隙能量，且進一步其中基於該雷射所發射的該光和該第二雷射所發射的該第二光在多個位置處同時蝕刻該半導體。

【請求項10】如請求項1所述的系統，其中該雷射是一脈衝雷射。

【請求項11】一種蝕刻一半導體的方法，該方法包括以下步驟：

從一雷射發射光，其中該光的光子能量小於該半導體的一帶隙能量；

聚焦從該雷射所發射的光，使得該光具有位於該半導體體內的一焦點，其中將該光聚焦在該半導體內導致在半導體中生成電洞；及

基於在該半導體中所生成的該等電洞，在該半導體中的位置處蝕刻該半導體。

【請求項12】如請求項11所述的方法，其中將該光引導穿過該半導體的一背側以到達該焦點。

【請求項13】如請求項11所述的方法，其中將該光引導穿過該半導體的一前側以到達該焦點。

【請求項14】如請求項11所述的方法，進一步包括以下步驟：在該半導體的一第一表面和該半導體的一第二表面之間施加一電壓，以在該半導體內形成一電場，其中基於在該半導體內所形成的該電場在該等位置處蝕刻該半導體。

【請求項15】如請求項11所述的方法，進一步包括以下步驟：

從一第二雷射發射第二光，其中該第二光的一第二光子能量小於該半導體的該帶隙能量；

聚焦從該第二雷射發射的該第二光，使得該第二光具有在該半導體內的一第二焦點，其中將該第二光聚焦在該半導體內導致在該半導體中生成第二電洞，且進一步其中該光和該第二光同時聚焦在該半導體內；及

基於在該半導體中所生成的該等第二電洞，在該半導體中的第二位置處蝕刻該半導體。

【發明圖式】

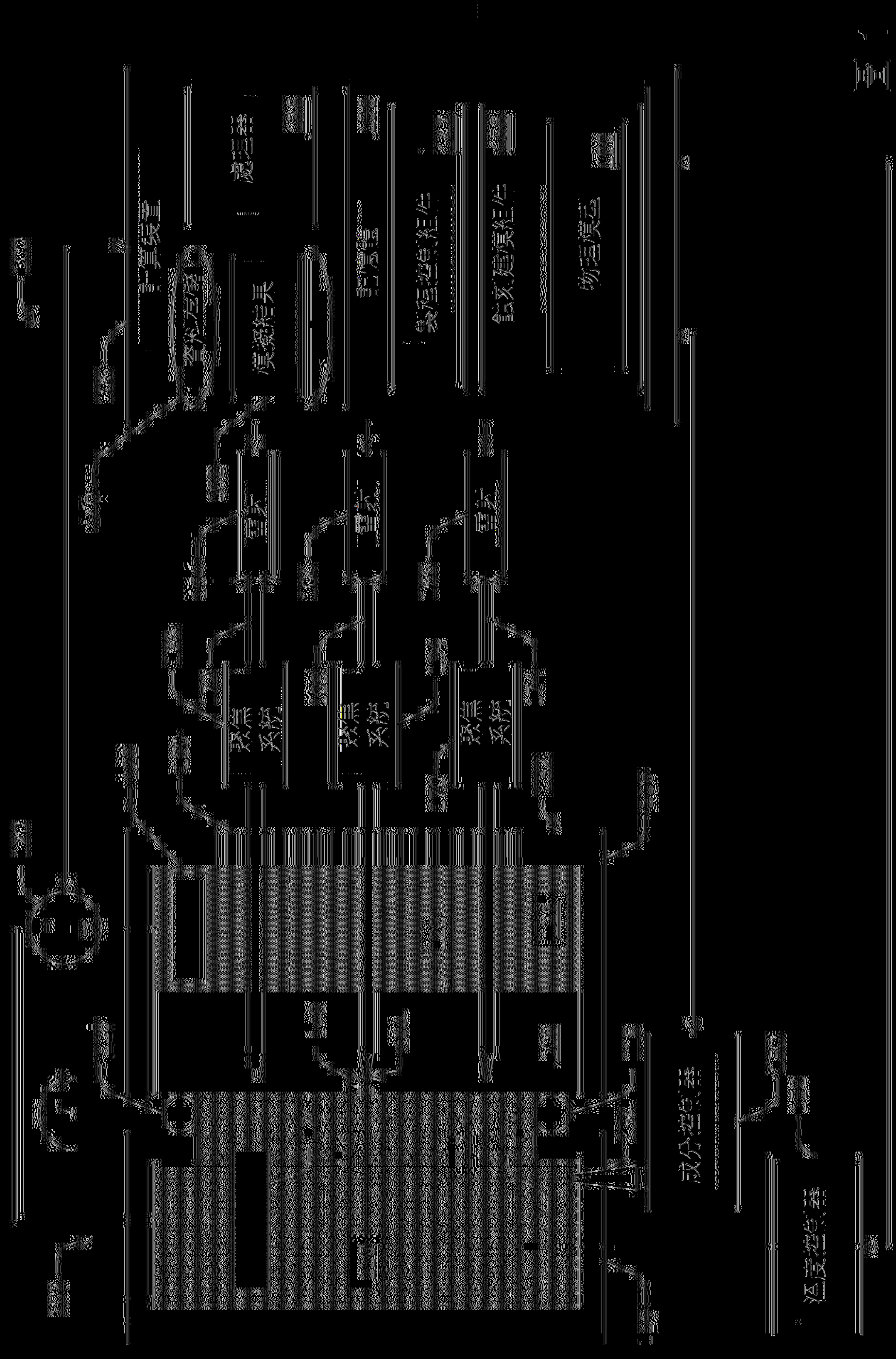
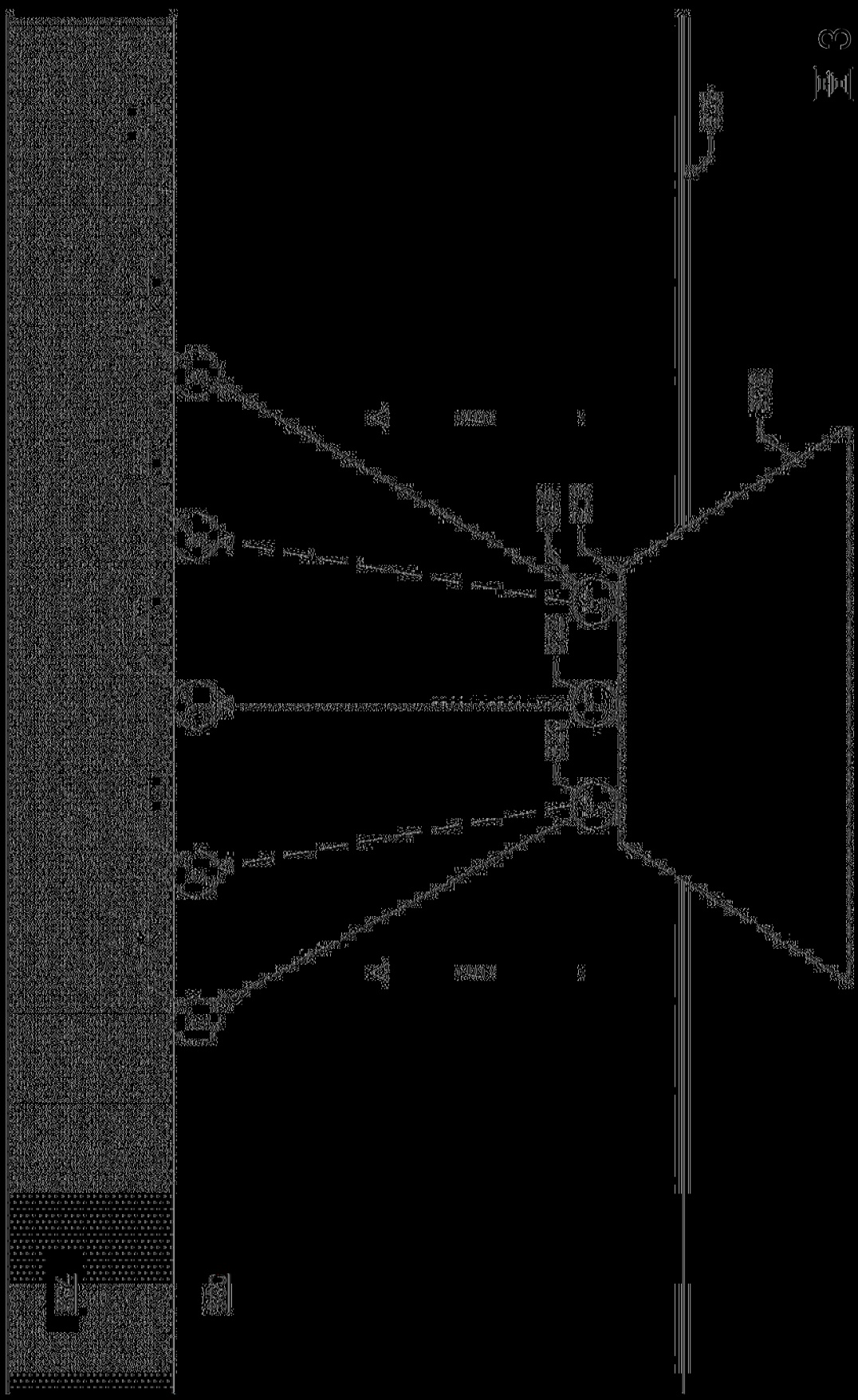
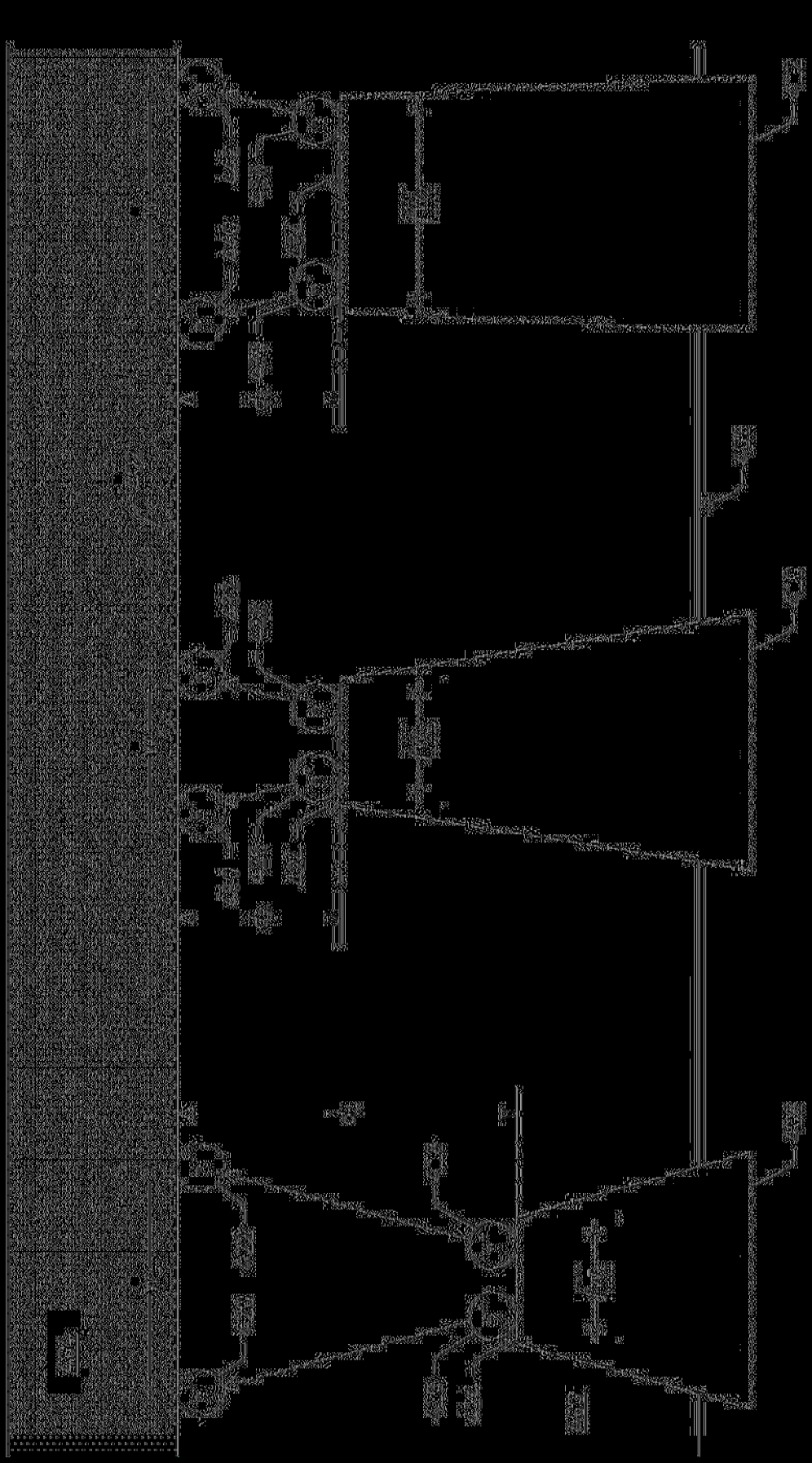
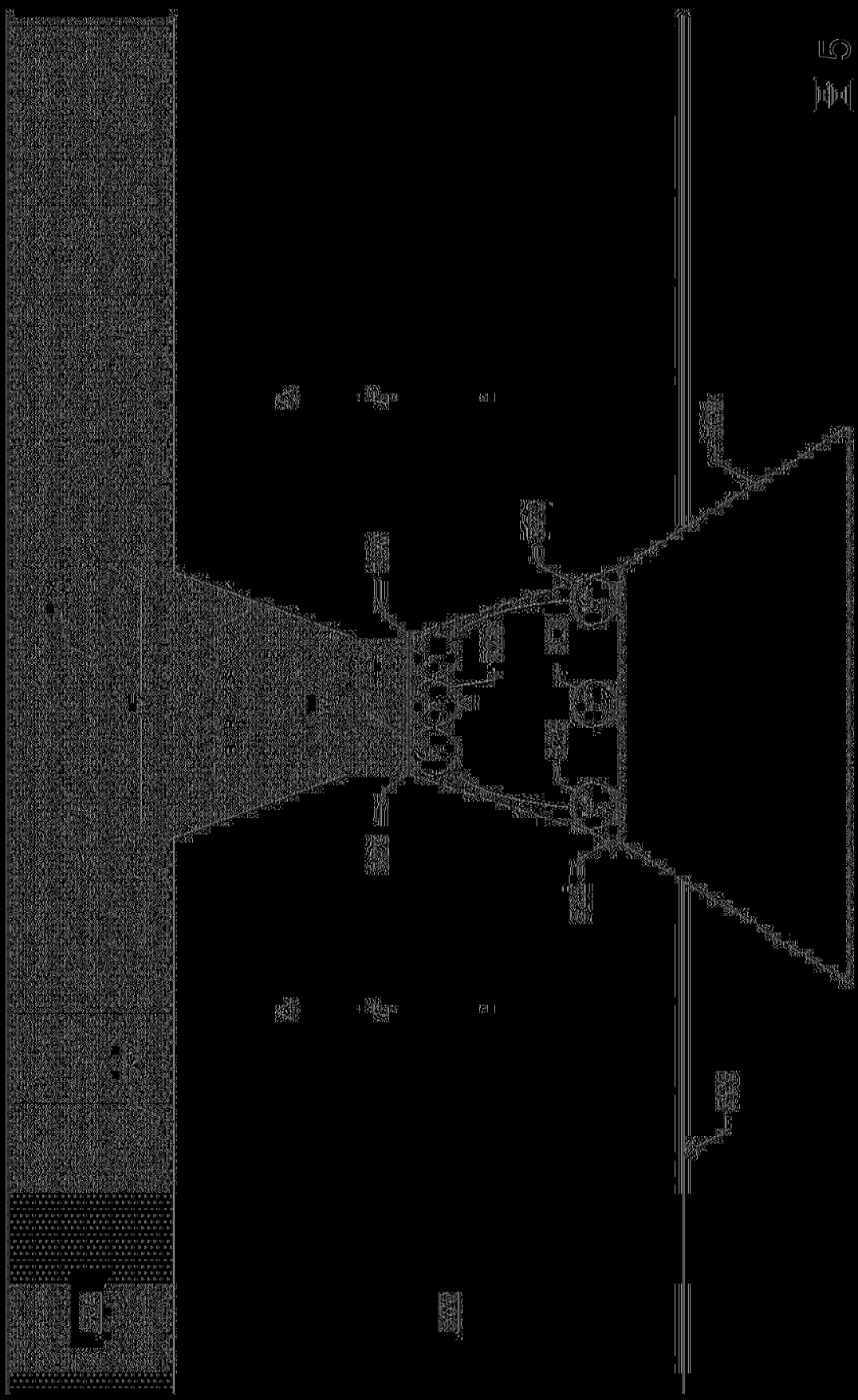


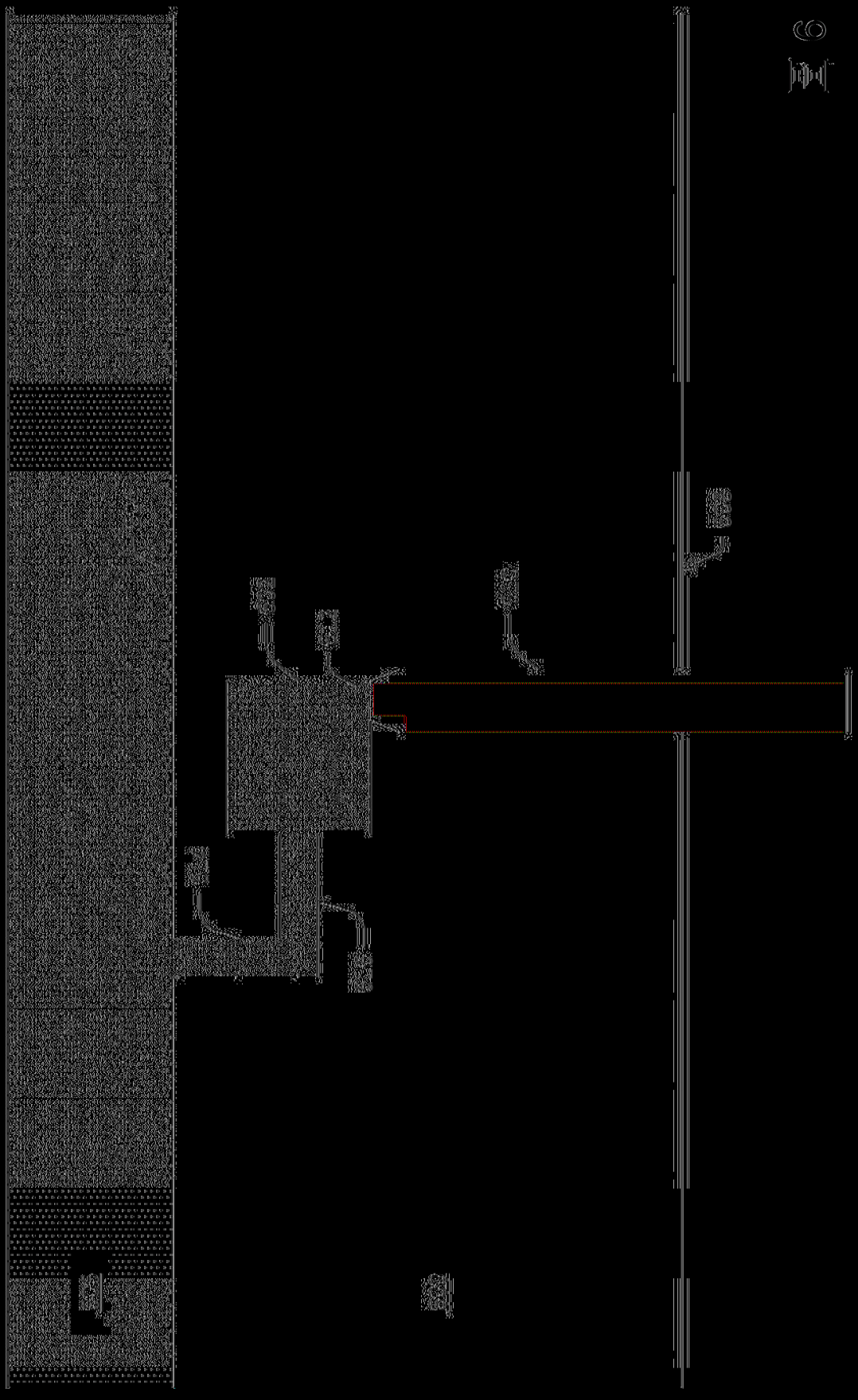
圖1

圖2
N1
N2
N2
N2
N3









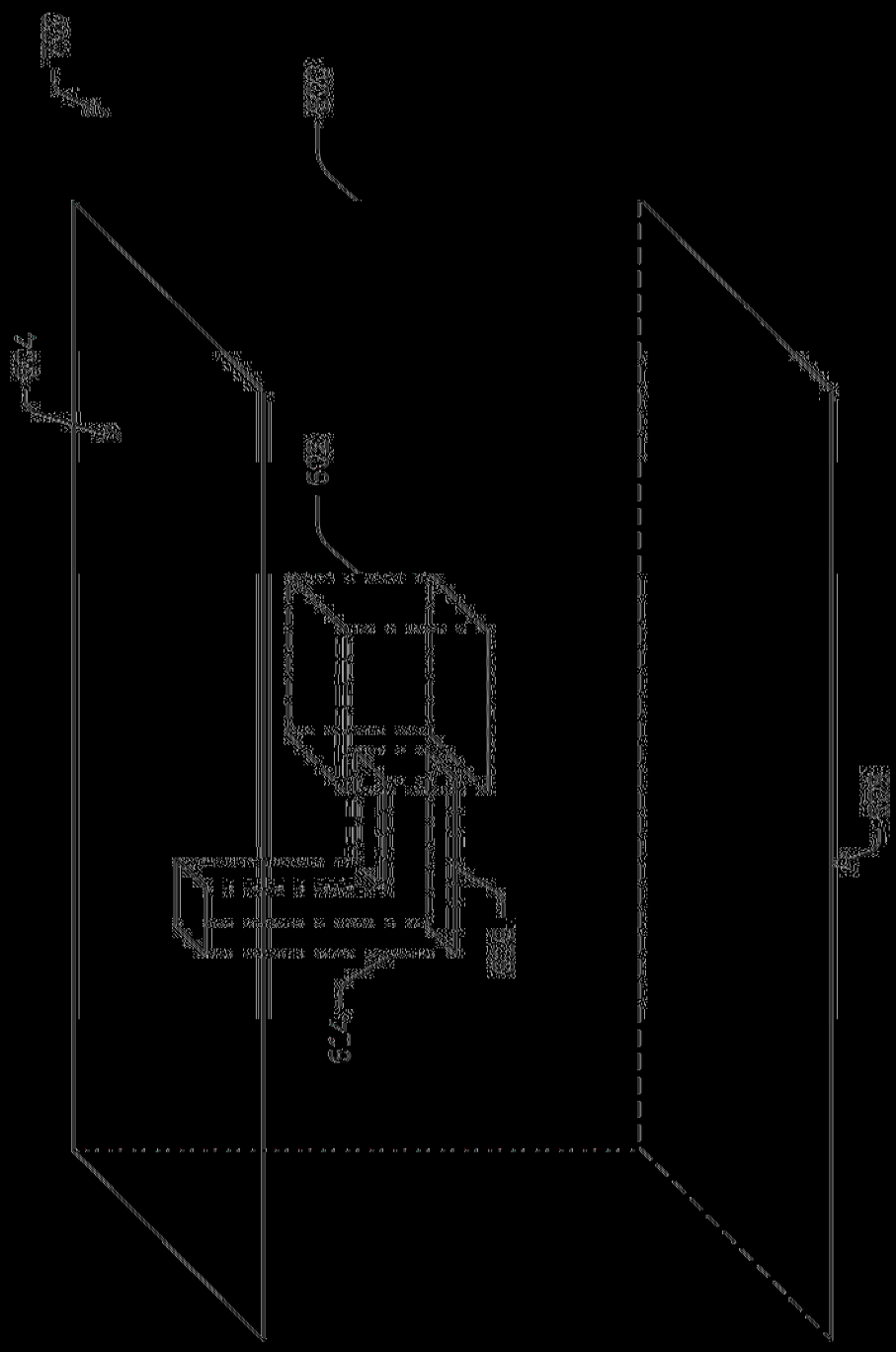


圖7

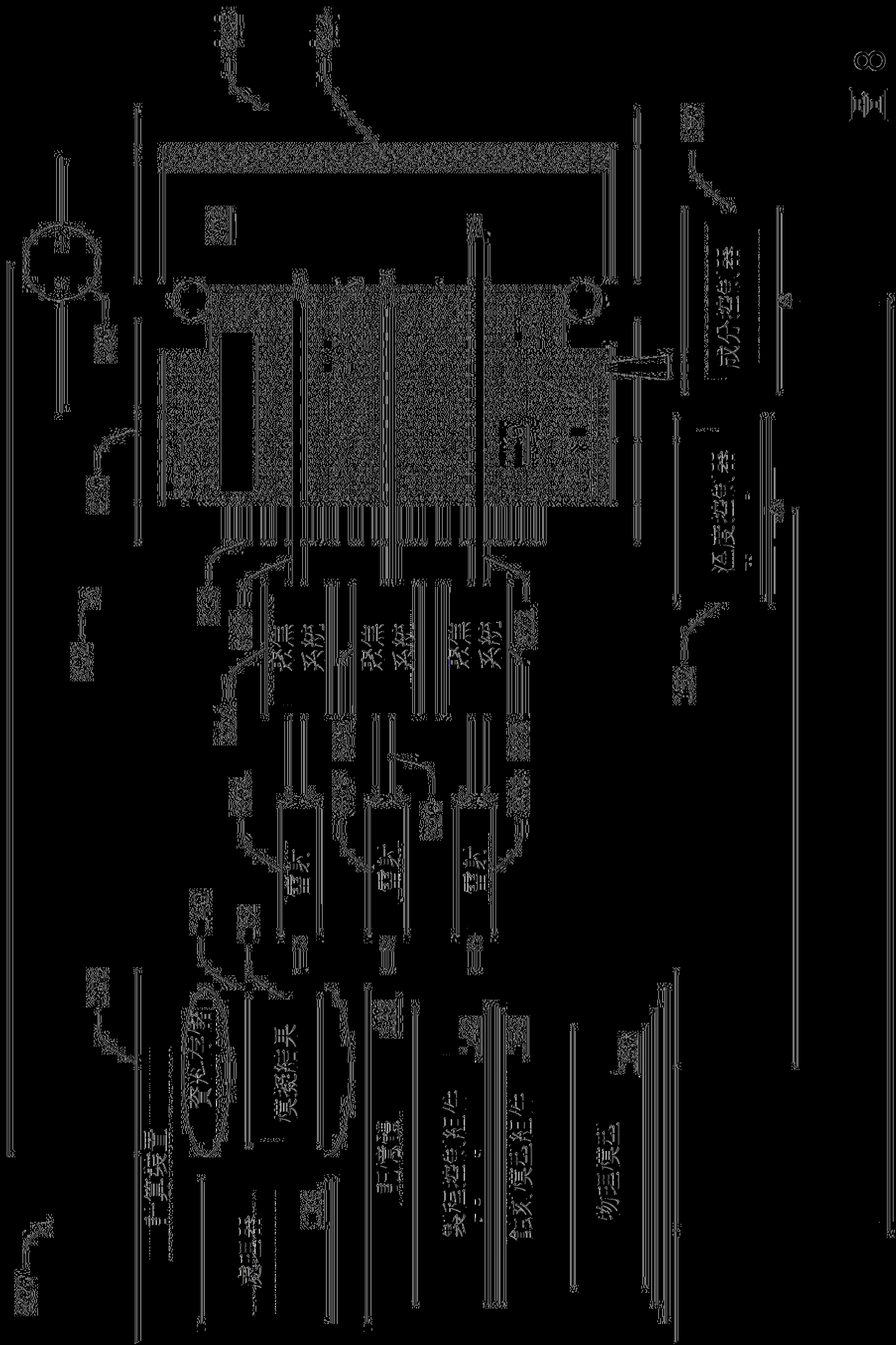
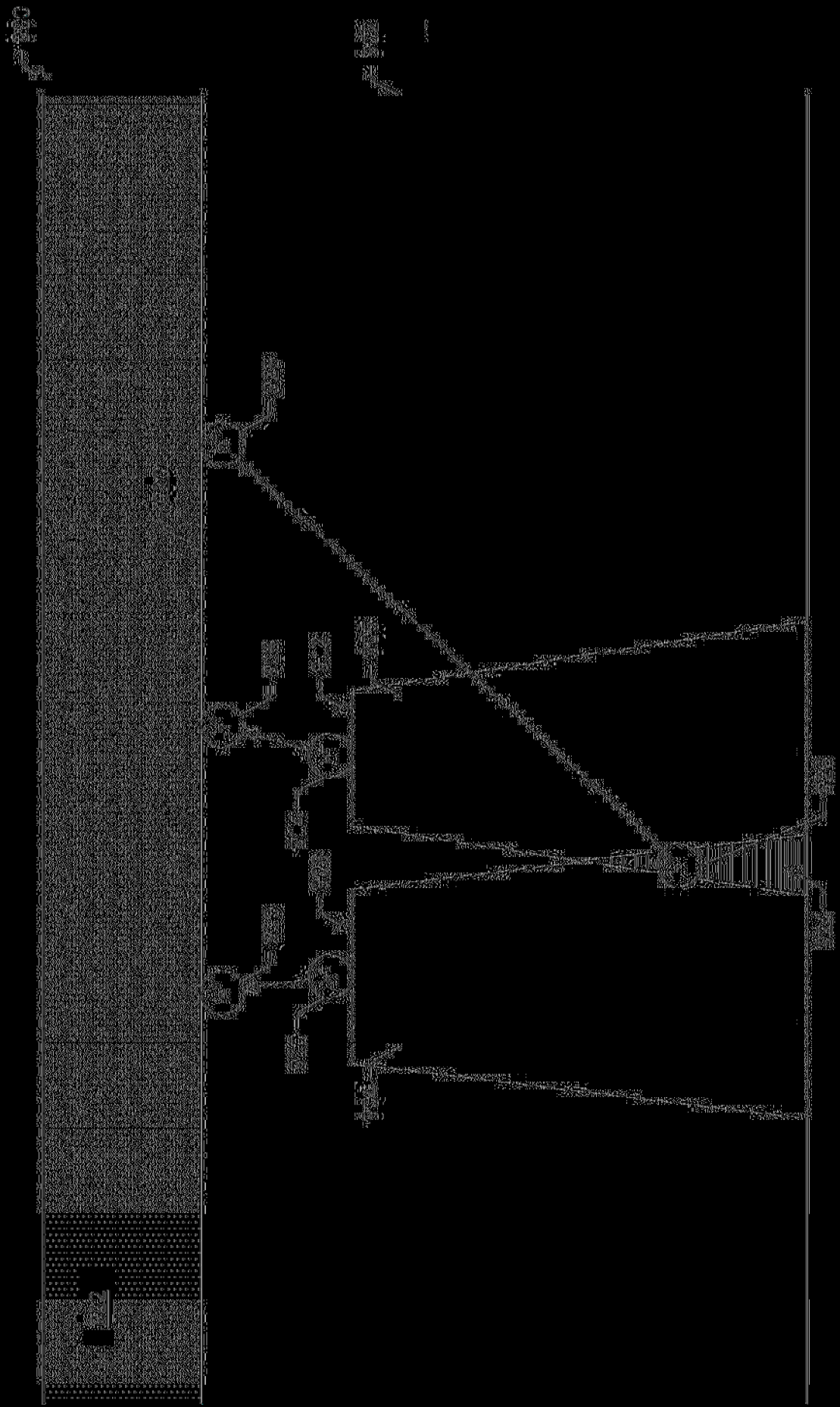
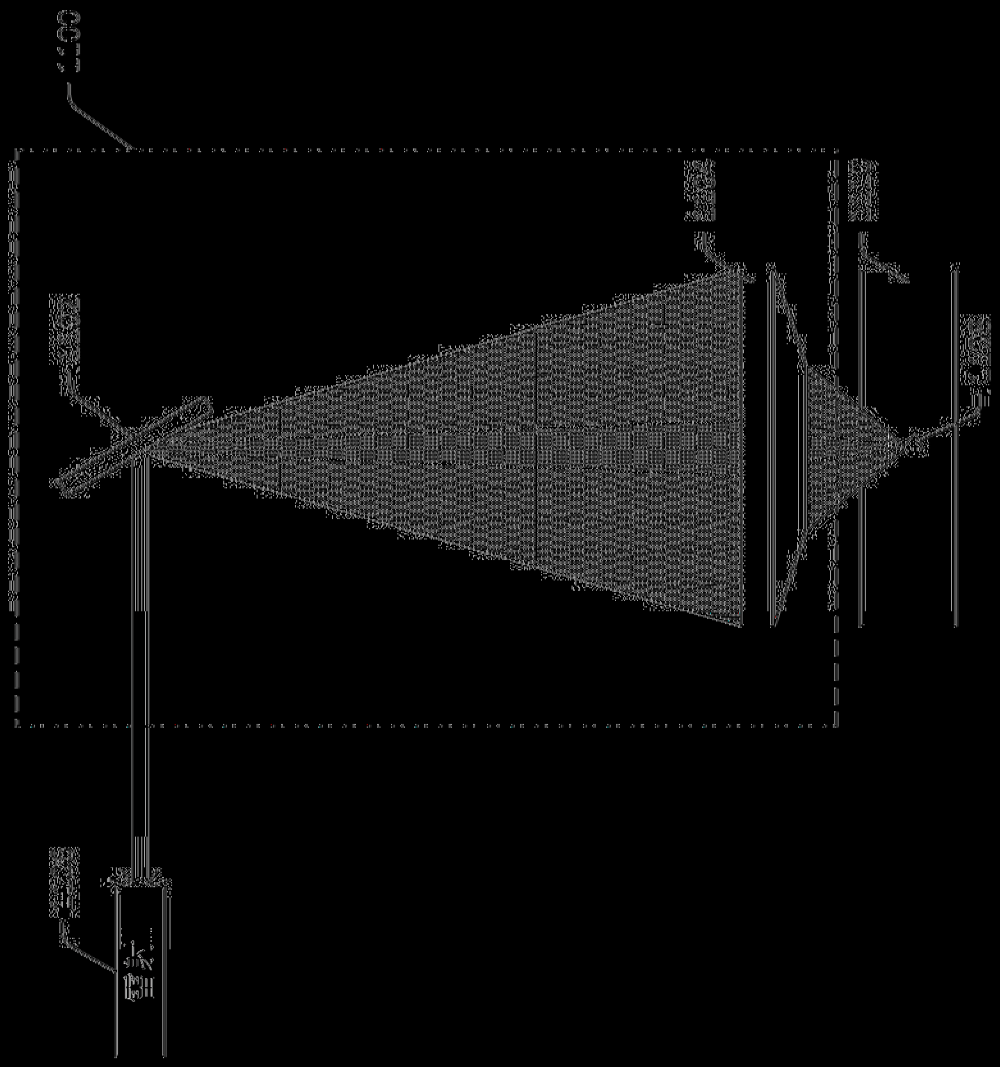


圖8



第二電極
第一電極
第一絕緣層
第二絕緣層
第一電極
第二電極
第一絕緣層
第二絕緣層
第一電極
第二電極
第一絕緣層
第二絕緣層



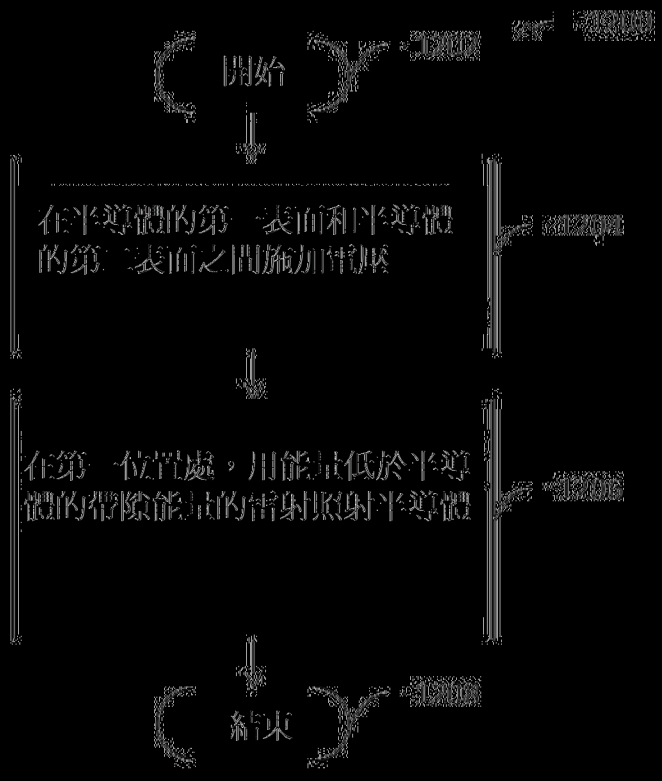

開始
在半導體的第一表面和半導體的第二表面之間施加電壓
在第一位置處，用能量低於半導體的帶隙能量的雷射照射半導體
結束

圖 12

圖3：
步驟一
步驟二
步驟三
步驟四
步驟五
步驟六
步驟七
步驟八
步驟九
步驟十