



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101365937 B

(45) 授权公告日 2015. 01. 14

(21) 申请号 200680046029. 7

代理人 张雪梅 王忠忠

(22) 申请日 2006. 10. 11

(51) Int. Cl.

(30) 优先权数据

G01N 21/64 (2006. 01)

2005905598 2005. 10. 11 AU

(56) 对比文件

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

CN 1620601 A, 2005. 05. 25, 权利要求 1-24, 附图 1-10.

2008. 06. 06

CN 1532518 A, 2004. 09. 29, 全文.

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/AU2006/001420 2006. 10. 11

审查员 孙劭

(87) PCT国际申请的公布数据

W02007/041758 EN 2007. 04. 19

(73) 专利权人 BT 成像股份有限公司

地址 澳大利亚新南威尔士省

(72) 发明人 T·特鲁普克 R·A·巴多斯

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
72001

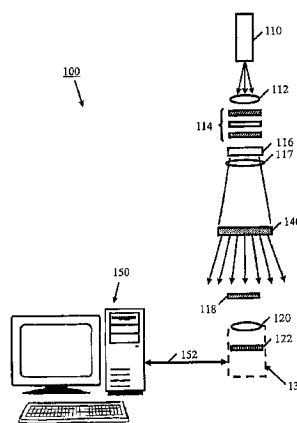
权利要求书2页 说明书12页 附图5页

(54) 发明名称

用于检查带隙半导体结构的方法和系统

(57) 摘要

本发明描述了用于检查间接带隙半导体结构(140)的方法(600)和系统(100)。光源(110)生成适于在所述间接带隙半导体结构(140)中引发光致发光的光(612)。短通滤波器单元(114)减少所生成的光中的高于指定发射峰值的长波长光。准直器(112)对所述光进行准直。利用所述经过准直以及短通滤波的光基本上均匀地且同时地照射所述间接带隙半导体结构(140)的大面积(618)。图像捕获设备(130)捕获由入射在所述间接带隙半导体结构的所述大面积上的所述基本上均匀的同时照射所引发的光致发光的图像(620)。对所述光致发光图像进行图像处理(622),以便利用在所述大面积内所引发的所述光致发光的空间变化来量化所述间接带隙半导体结构(140)的空间分辨的指定电子特性。



1. 一种确定间接带隙半导体材料的局部材料参数的方法,所述方法包括以下步骤:
利用光源从一侧照射所述半导体材料,产生光的所述光源适合于在所述间接带隙半导体材料中引发光致发光;
利用图像捕获设备从被照射的同一侧或从相对侧捕获所述照射在所述半导体材料的大面积内引发的光致发光的图像;以及
对所捕获的光致发光的图像应用图像处理技术,以便利用在所述大面积内所引发的所述光致发光的空间变化来确定所述半导体材料的所述局部材料参数,其中所述方法用于以大约每秒一个晶片的速度检查硅晶片。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中所述图像处理技术包括使用所述图像中的空间变化来确定所述局部材料参数的空间变化。
3. 根据权利要求1所述的方法,其中所述照射在所述面积上是基本上均匀的。
4. 根据前面权利要求1-3中的任一项所述的方法,其中入射在所述图像捕获设备上的所述照射和/或光在捕获所述图像之前被滤波。
5. 根据权利要求4所述的方法,其中入射在所述图像捕获设备上的所述照射和/或所述光经受短通滤波或长通滤波以选择性地除去预定波长。
6. 根据权利要求4所述的方法,其中所述照射被短通滤波以基本上除去所述光致发光的波长范围内的分量。
7. 根据权利要求4所述的方法,其中入射在所述图像捕获设备上的所述光被长通滤波以基本上防止所述照射被成像。
8. 根据前面权利要求1-3中的任一项所述的方法,其中所述材料用作长通滤波器以基本上防止所述照射被成像。
9. 根据前面权利要求1-3中的任一项所述的方法,其中所述面积是至少 1 cm^2 。
10. 根据前面权利要求1-3中的任一项所述的方法,其中所述照射、捕获和处理步骤中的任一个是在生产过程的一个或多个步骤之后进行的。
11. 根据前面权利要求1-3中的任一项所述的方法,其中所述方法适用于选自包括下述的组的硅晶片:裸晶片或部分处理过的晶片、完全制造的硅器件和太阳能电池。
12. 根据权利要求11所述的方法,其中所述面积包括所述材料的整个面积。
13. 根据前面权利要求1-3中的任一项所述的方法,其中所述照射、捕获和处理步骤是在不与所述材料电接触的情况下实现的。
14. 根据前面权利要求1-3中的任一项所述的方法,其中所述局部材料参数选自包括下述的组:局部缺陷密度、局部旁路、局部电流-电压特性、局部扩散长度和局部少数载流子寿命。
15. 根据前面权利要求1-3中的任一项所述的方法,其中所述材料在室温下。
16. 根据前面权利要求1-3中的任一项所述的方法,其中所述图像捕获设备包括像素检测器、或聚焦元件以及光敏电子元件的焦平面阵列。
17. 根据权利要求16所述的方法,其中所述光敏元件的焦平面阵列包括电荷耦合器件(CCD)阵列。
18. 根据权利要求16所述的方法,其中所述焦平面阵列由硅或 InGaAs 制成。
19. 一种用于确定间接带隙半导体材料的局部材料参数的系统,所述系统包括:

光源,用于从一侧照射所述半导体材料,所述光源适合于在所述间接带隙半导体材料中引发光致发光;

图像捕获设备,用于从与所述照射的同一侧或从相对侧捕获所述照射在所述半导体材料的大面积内引发的光致发光的图像;和

处理器,用于对所捕获的光致发光的图像应用图像处理技术,以便利用在所述大面积内所引发的所述光致发光的空间变化来确定所述半导体材料的所述局部材料参数,其中所述系统适于以大约每秒一个晶片的速度检查硅晶片。

20. 根据权利要求 19 所述的系统,其中所述图像处理技术包括使用所述图像的空间变化确定所述局部材料参数的空间变化。

21. 根据权利要求 19 或权利要求 20 所述的系统,其中所述面积被基本上均匀地照射。

22. 根据权利要求 19 或权利要求 20 所述的系统,进一步包括一个或多个滤波器,其中入射在所述图像捕获设备上的所述照射和 / 或光在被捕获之前被滤波。

23. 根据权利要求 22 所述的系统,其中所述滤波器包括设置在所述光源和所述材料之间的短通滤波器,用于基本上除去所述照射的在所述光致发光的波长范围内的分量。

24. 根据权利要求 22 所述的系统,其中所述滤波器包括设置在所述材料和所述图像捕获设备之间的长通滤波器,用于基本上防止所述照射到达所述图像捕获设备。

25. 根据权利要求 19 或权利要求 20 所述的系统,其中所述材料设置在所述光源和所述图像捕获设备之间,用于基本上防止所述照射到达所述图像捕获设备。

26. 根据权利要求 19 或权利要求 20 所述的系统,其中所述系统适于捕获所述材料的在至少 1 cm^2 内引发的光致发光的图像。

27. 根据权利要求 19 或权利要求 20 所述的系统,其中所述硅晶片选自包括下述的组:裸晶片或部分处理过的晶片、完全制造的硅器件和太阳能电池。

28. 根据权利要求 27 所述的系统,其中所述光源和所述图像捕获设备适于捕获在所述半导体材料的整个面积内引发的光致发光的图像。

29. 根据权利要求 19 或权利要求 20 所述的系统,其中所述局部材料参数选自包括下述的组:局部缺陷密度、局部旁路、局部电流-电压特性、局部扩散长度和局部少数载流子寿命。

30. 根据权利要求 19 或权利要求 20 所述的系统,其中所述图像捕获设备包括像素检测器、或聚焦元件以及光敏电子元件的焦平面阵列。

31. 根据权利要求 30 所述的系统,其中所述光敏元件的焦平面阵列包括电荷耦合器件(CCD)阵列。

32. 根据权利要求 30 所述的系统,其中所述焦平面阵列由硅或 InGaAs 制成。

用于检查带隙半导体结构的方法和系统

技术领域

[0001] 本发明总体上涉及半导体测试,更具体来说,本发明涉及对间接带隙半导体材料的测试。

背景技术

[0002] 光电制造是一个正在快速扩张的市场,其典型的年增长率高于百分之三十(30%)。居主导地位的太阳能电池制造部分是基于多晶体晶片的技术。在该产业中,总生产量的很大一部分低于规范并且被报废,从而导致该产业每一年都遭受很大的财务损失。生产太阳能电池涉及到开始于半导体裸晶片(例如硅)的高度专业化的处理步骤序列。

[0003] Bel'kov, VV 等人的“Microwave-induced patterns in n-GaAs and their photoluminescence imaging(n-GaAs中的微波引发的模式及其光致发光成像)”(Physical Review B, Vol. 61, No. 20, The American Physical Society, 2000 年 5 月 15 日, pp. 13698-13702)描述了一种对 n-GaAs 进行光致发光(PL)成像的技术。光致发光是由半导体材料响应于光学激发而发射的光。利用所述光致发光成像,可以在均匀的微波辐射下在均匀的 n-GaAs 层中无接触地研究高电子密度的自组织模式。所述 n-GaAs 无接触样品被容纳在矩形波导中,所述矩形波导具有用于观测的网状金属窗口,其耦合到微波发生器并且受到微波辐射。包括所述 n-GaAs 样品的该组件在包含液体氮的致冷浴(bath cryostat)中被冷却到 4.2K,并且利用被组织成环状的几个红色(620nm)发光二极管对其进行均匀照射。所述致冷器具有与所述网状金属窗口对准的窗口。把视频摄影机定向成面向所述样品,光学器件和 820nm(长通)干涉滤波器被按照该顺序插入在所述致冷器窗口与所述摄影机之间。该摄影机捕获 3mm×4mm 的图像,其中的某些图像显示出来自受微波辐射的所述样品的光致发光中的黑点的形成。

[0004] Bel'kov 的所述系统可以被用来测试 n-GaAs,其是直接带隙半导体。由于这种半导体中的光致发光效率很高,因此可以把相对较低功率的 LED 用作光源以便引发光致发光,在所述光致发光中,所述源照射发散。此外,所述波导和致冷器窗口的设置限制了所述摄影机的可视区域。不利的是,这样仅仅允许测试较小的面积(3mm×7mm)。此外,所述系统需要在由致冷器产生的低温下来测试样品。Bel'kov 的所述配置允许通过所述视频摄影机来捕获来自所述 LED 的源照射。所述长通滤波器意在阻断来自所述 LED 的照射并且把高于 820nm 的光致发光透射到所述摄影机,但是同时也把来自所述 LED 的高于 820nm 的任何照射都透射到了该摄影机。对于 n-GaAs 样品来说,所生成的高效率光致发光大大超出来自所述 LED 的任何不合期望的照射。根据这些限制以及其他限制, Bel'kov 的所述系统不适用于测试间接带隙半导体。

[0005] Masarotto 等人的“Development of a UV scanning photoluminescence apparatus for SiC characterization(开发用于 SiC 表征的 UV 扫描光致发光设备)”(Eur J AP 20, 141-144, 2002)描述了一种用于表征 SiC 的经过适配的扫描 PL 设备。通过利用具有 1 μm 步长的 x-y 扫描台以及通过显微场透镜聚焦的双 Ar⁺ 激光束扫描所述样品而获得 PL

映射,其中的光点直径为 $4\mu\text{m}$ 。可以获得积分 PL 强度或者光谱分辨的 PL。该系统按照逐点方式扫描 PL。这种系统的不利之处在于,由于所述扫描操作,在任何给定时间仅仅允许测试较小面积(即一点)。无法在大面积的均匀照射下在所述样品的大面积上同时捕获光致发光,而如果可以的话则将是半导体器件的更好的近似操作条件。此外,这种系统由于该系统的扫描操作而较慢。

[0006] 因此,需要一种用于间接带隙半导体结构(特别是硅)的检查系统,其中包括在其他情况下可能导致报废的半导体电池的裸晶片或部分处理过的晶片。

发明内容

[0007] 根据本发明的一方面,提供一种检查间接带隙半导体结构的方法。该方法包括以下步骤:生成适于在所述间接带隙半导体结构中引发光致发光的光;对所述光进行短通滤波,以便减少所生成的光中的高于指定发射峰值的长波长光;对所述光进行准直;利用所述经过准直以及短通滤波的光基本上均匀地且同时地照射所述间接带隙半导体结构的大面积;利用能够同时捕获所引发的光致发光的图像捕获设备来捕获由入射在所述间接带隙半导体结构的所述大面积上的基本上均匀的同时照射所同时引发的光致发光的图像;对所述光致发光图像进行图像处理,以便利用在所述大面积内所引发的所述光致发光的空间变化来量化所述间接带隙半导体结构的指定电子特性。

[0008] 所述间接带隙半导体可以包括硅。所述结构可以包括:间接带隙半导体材料的裸晶片或部分处理过的晶片,至少一个部分形成的电子器件,或者裸绝缘体上硅(SOI)结构或部分处理过的绝缘体上硅结构。所述电子器件可以是光电器件。

[0009] 可以利用一个或多个短通滤波器来实现所述短通滤波步骤。可以利用电介质反射镜来实现所述短通滤波步骤,所述电介质反射镜反射将被使用的短波长光并且透射所不需要的长波长分量。所述短通滤波步骤可以把所生成的光的长波长拖尾中的总光子通量减少了大约十倍或更多,其中所述长波长拖尾开始于比用于生成所述光的源的最长波长发射峰值高大约百分之十(10%)的波长。

[0010] 所述间接带隙半导体结构的受照射面积可以等于或大于大约 1.0cm^2 。

[0011] 所述方法可以进一步包括将所生成的光均匀化的步骤。

[0012] 所述方法可以在室温下执行。

[0013] 所生成的光可以是单色光或者基本上单色的光。所述光可以由至少一个激光器、激光二极管、激光二极管阵列或者高功率发光二极管(LED)生成。或者,所述光可以由发光二极管(LED)阵列或者宽光谱灯生成,并且其可以被滤波以便限制所述光的光谱。

[0014] 所述光的总光学功率可以超出大约 1 瓦特。

[0015] 所生成的光的源可以被指向所述结构的一侧的表面以便照射该表面,并且所述图像捕获设备被指向该相同表面以便从该表面捕获所述光致发光的图像。或者,所生成的光的源被指向所述结构的一侧的表面以便照射该表面,并且图像捕获设备被指向所述结构的相对侧的表面以便从该相对侧的表面捕获所述光致发光的图像。

[0016] 所述方法还可以包括对在所述硅结构中所引发的光致发光进行长通滤波的步骤。对于被用来激发所述光致发光的入射光来说,所述结构可以充当其长通滤波器。可以与所述图像捕获设备相组合地使用一个或多个长通滤波器。所述图像捕获设备可以包括聚焦元

件以及光敏电子元件的焦平面阵列。所述光敏电子元件的焦平面阵列可以包括电荷耦合器件 (CCD) 阵列。所述焦平面阵列可以由硅制成。所述光敏电子元件的焦平面阵列可以由 InGaAs 制成。所述焦平面阵列可以被冷却。

[0017] 所述图像捕获设备可以包括像素检测器。所述像素检测器可以是耦合到所述结构的表面的接触像素检测器。

[0018] 所述图像捕获设备可以是像素检测器或者电荷耦合器件 (CCD) 阵列, 并且可以把锥形光纤束耦合在所述结构的表面与所述像素检测器或 CCD 阵列之间。

[0019] 所述指定的电子特性包括下述中的一个或多个: 局部缺陷密度, 局部旁路, 局部电流-电压特性, 局部扩散长度, 以及局部少数载流子寿命。

[0020] 根据本发明的另一方面, 提供一种用于检查间接带隙半导体结构的系统。该系统包括: 光源, 其用于生成适于在所述间接带隙半导体结构中引发光致发光的光; 短通滤波器单元, 其被布置在所述光源与间接带隙半导体结构之间, 以便减少所生成的光中的高于指定发射峰值的长波长光; 准直器, 其被布置在所述光源与间接带隙半导体结构之间, 从而利用经过准直以及短通滤波的光基本上均匀地且同时地照射所述间接带隙半导体结构的大面积; 图像捕获设备, 其被指向所述间接带隙半导体结构以用于捕获由入射光入射在所述间接带隙半导体结构的所述大面积上的基本上均匀的同时照射所引发的光致发光的图像。

[0021] 所述系统还可以包括图像处理器, 其用于对所述光致发光图像进行图像处理, 以便量化所述间接带隙半导体结构的空間分辨的指定电子特性。

[0022] 所述间接带隙半导体可以包括硅。所述结构可以包括: 间接带隙半导体材料的裸晶片或部分处理过的晶片, 至少一个部分形成的电子器件, 或者裸绝缘体上硅 (SOI) 结构或部分处理过的绝缘体上硅结构。所述电子器件可以是光电器件。

[0023] 所述短通滤波器单元可以包括一个或多个短通滤波器。所述短通滤波器单元可以包括一个或多个电介质反射镜, 所述电介质反射镜反射将被使用的短波长光并且透射所不需要的长波长分量。所述短通滤波器单元可以把所生成的光的长波长拖尾中的总光子通量减少了大约十倍或更多, 其中所述长波长拖尾开始于比用于生成所述光的光源的最长波长发射峰值高大约百分之十 (10%) 的波长。

[0024] 所述间接带隙半导体结构的受照射面积可以等于或大于大约 1.0cm^2 。

[0025] 所述系统可以进一步包括光束均匀化器, 以便将所述受照射面积上的入射光均匀化。

[0026] 所述系统可以在室温下检查所述间接带隙半导体样品。

[0027] 所生成的光可以是单色光或者基本上单色的光。

[0028] 所述光源可以包括至少一个激光器、激光二极管、激光二极管阵列或者高功率发光二极管 (LED)、发光二极管 (LED) 阵列或者宽光谱灯, 其与一个或多个滤波器相组合以便限制所述光的光谱。

[0029] 所述光的总光学功率可以超出大约 1 瓦特。

[0030] 所述光源可以被指向所述结构的一侧的表面以便照射该表面, 并且所述图像捕获设备被指向该相同表面以便从该表面捕获所述光致发光的图像。或者, 所述光源可以被指向所述结构的一侧的表面以便照射该表面, 并且所述图像捕获设备被指向所述结构的相对

侧的表面以便从该相对侧的表面捕获所述光致发光的图像。

[0031] 对于被用来激发所述光致发光的入射光来说,所述结构可以充当其长通滤波器。

[0032] 所述系统可以进一步包括一个或多个长通滤波器,以便与所述图像捕获设备相组合地使用。所述图像捕获设备可以包括聚焦元件以及光敏电子元件的焦平面阵列。所述光敏电子元件的焦平面阵列可以包括电荷耦合器件 (CCD) 阵列。所述焦平面阵列可以由硅制成。所述光敏电子元件的焦平面阵列可以由 InGaAs 制成。所述焦平面阵列可以被冷却。

[0033] 所述图像捕获设备可以包括像素检测器。所述像素检测器可以是耦合到所述结构的表面的接触像素检测器。

[0034] 所述图像捕获设备可以是像素检测器或者电荷耦合器件 (CCD) 阵列,并且还可以包括耦合在所述结构的表面与所述像素检测器或 CCD 阵列之间的锥形光纤束。

[0035] 所述指定的电子特性包括下述中的一个或多个:局部缺陷密度,局部旁路,局部电流-电压特性,局部扩散长度,以及局部少数载流子寿命。

[0036] 根据本发明的另一方面,提供一种检查硅结构的方法。该方法包括以下步骤:生成适于在所述硅结构中引发光致发光的光;对所述光进行短通滤波,以便减少所生成的光中的高于指定发射峰值的长波长光;对所述光进行准直;利用所述经过准直以及短通滤波的光基本上均匀地且同时地照射所述硅结构的一侧的大面积;以及利用能够同时捕获所引发的光致发光的图像捕获设备来捕获由入射在所述硅结构的所述大面积上的基本上均匀的同时照射所同时引发的光致发光的图像。

[0037] 所述方法还可以包括以下步骤:对所述光致发光图像进行图像处理,以便量化所述硅结构的分辨的指定电子特性。

[0038] 所述结构包括:硅材料的裸晶片或部分处理过的晶片,由硅制成的至少部分地形成的光电器件,或者裸绝缘体上硅 (SOI) 结构或部分处理过的绝缘体上硅结构。

[0039] 可以利用一个或多个短通滤波器来实现所述短通滤波步骤。可以利用电介质反射镜来实现所述短通滤波步骤,所述电介质反射镜反射将被使用的短波长光并且透射所不需要的长波长分量。

[0040] 所述短通滤波步骤可以把所生成的光的长波长拖尾中的总光子通量减少了大约十倍或更多,其中所述长波长拖尾开始于比用于生成所述光的光源的最长波长发射峰值高大约百分之十 (10%) 的波长。

[0041] 所述硅结构的受照射面积可以等于或大于大约 1.0cm^2 。

[0042] 所述方法可以进一步包括将所生成的光均匀化的步骤。

[0043] 所述方法可以在室温下执行。

[0044] 所生成的光可以是单色光或者基本上单色的光。所述光可以由至少一个激光器、激光二极管、激光二极管阵列、高功率发光二极管 (LED)、发光二极管 (LED) 阵列或者宽光谱灯生成,并且其可以被滤波以便限制所述光的光谱。

[0045] 所述光的总光学功率可以超出大约 1 瓦特。

[0046] 所生成的光的源可以被指向所述结构的一侧的表面以便照射该表面,并且图像捕获设备被指向该相同表面以便从该表面捕获所述光致发光的图像。或者,所生成的光的源被指向所述结构的一侧的表面以便照射该表面,并且图像捕获设备被指向所述结构的相对侧的表面以便从该相对侧的表面捕获所述光致发光的图像。

[0047] 所述方法还可以包括对在所述硅结构中所引发的光致发光进行长通滤波的步骤。对于被用来激发所述光致发光的入射光来说,所述结构可以充当其长通滤波器。可以与所述图像捕获设备相组合地使用一个或多个长通滤波器。所述图像捕获设备可以包括聚焦元件以及光敏电子元件的焦平面阵列。所述光敏电子元件的焦平面阵列可以包括电荷耦合器件 (CCD) 阵列。所述焦平面阵列可以由硅制成。所述光敏电子元件的焦平面阵列可以由 InGaAs 制成。所述焦平面阵列可以被冷却。

[0048] 所述图像捕获设备可以包括像素检测器。所述像素检测器可以是耦合到所述结构的表面的接触像素检测器。

[0049] 所述图像捕获设备可以是像素检测器或者电荷耦合器件 (CCD) 阵列,并且可以把锥形光纤束耦合在所述结构的表面与所述像素检测器或 CCD 阵列之间。

[0050] 所述指定的电子特性包括下述中的一个或多个:局部缺陷密度,局部旁路,局部电流-电压特性,局部扩散长度,以及局部少数载流子寿命。

[0051] 根据本发明的另一方面,提供一种用于检查硅结构的系统。该系统包括:光源,其用于生成适于在所述硅结构中引发光致发光的光;短通滤波器单元,其被布置在所述光源与硅结构之间,以便减少所生成的光中的高于指定发射峰值的长波长光;准直器,其被布置在所述光源与硅结构之间,从而利用经过短通滤波的光基本上均匀地且同时地照射所述硅结构的一侧的大面积;以及图像捕获设备,其用于捕获由入射光入射在所述硅结构的所述大面积上的基本上均匀的同时照射所引发的光致发光的图像。

[0052] 所述系统还可以包括图像处理器,其用于对所述光致发光图像进行处理,以便量化所述硅结构的分辨的指定电子特性。

[0053] 所述结构包括:硅材料的裸晶片或部分处理过的晶片,由硅制成的至少部分地形成的光电器件,或者裸绝缘体上硅 (SOI) 结构或部分处理过的绝缘体上硅结构。

[0054] 所述短通滤波器单元可以包括一个或多个短通滤波器。所述短通滤波器单元可以包括一个或多个电介质反射镜,所述电介质反射镜反射将被使用的短波长光并且透射所不需要的长波长分量。

[0055] 所述一个或多个短通滤波器把所生成的光的长波长拖尾中的总光子通量减少了大约十倍或更多,其中所述长波长拖尾开始于比用于生成所述光的光源的最长波长发射峰值高大约百分之十 (10%) 的波长。

[0056] 所述硅结构的受照射面积可以等于或大于大约 1.0cm^2 。

[0057] 所述系统可以进一步包括光束均匀化器,其用于将所生成的光均匀化。

[0058] 所述系统可以在室温下检查所述硅结构。

[0059] 所生成的光可以是单色光或者基本上单色的光。

[0060] 所述光源可以包括至少一个激光器、激光二极管、激光二极管阵列、高功率发光二极管 (LED)、发光二极管 (LED) 阵列或者宽光谱灯,并且其可以被滤波以便限制所述光的光谱。

[0061] 所述光的总光学功率可以超出大约 1 瓦特。

[0062] 所述光源可以被指向所述硅结构的一侧的表面以便照射该表面,并且所述图像捕获设备被指向该相同表面以便从该表面捕获所述光致发光的图像。或者,所述光源可以被指向所述硅结构的一侧的表面以便照射该表面,并且所述图像捕获设备被指向所述结构的

相对侧的表面以便从该相对侧的表面捕获所述光致发光的图像。

[0063] 所述系统可以进一步包括一个或多个长通滤波器,其用于对进入所述图像捕获设备的光进行长通滤波。

[0064] 所述图像捕获设备可以包括聚焦元件以及光敏电子元件的焦平面阵列。所述光敏电子元件的焦平面阵列可以包括电荷耦合器件 (CCD) 阵列。所述焦平面阵列可以由硅制成。所述光敏电子元件的焦平面阵列可以由 InGaAs 制成。所述焦平面阵列可以被冷却。

[0065] 所述图像捕获设备可以包括像素检测器。所述像素检测器可以是耦合到所述结构的表面的接触像素检测器。

[0066] 所述图像捕获设备可以是像素检测器或者电荷耦合器件 (CCD) 阵列,并且还可以包括耦合在所述结构的表面与所述像素检测器或 CCD 阵列之间的锥形光纤束。

[0067] 所述指定的电子特性可以包括下述中的一个或多个:局部缺陷密度,局部旁路,局部电流-电压特性,局部扩散长度,以及局部少数载流子寿命。

[0068] 可以根据上述方法的细节实现该系统的其他方面。

附图说明

[0069] 下面参照附图描述本发明的实施例,其中:

[0070] 图 1 是根据本发明的一个实施例的用于检查间接带隙半导体结构的系统的方框图;

[0071] 图 2 是根据本发明的另一个实施例的用于检查间接带隙半导体结构的系统的方框图;

[0072] 图 3 是根据本发明的另一个实施例的用于检查间接带隙半导体结构的系统的方框图;

[0073] 图 4 是根据本发明的另一个实施例的用于检查间接带隙半导体结构的系统的方框图;

[0074] 图 5 是根据本发明的另一个实施例的用于检查间接带隙半导体结构的系统的方框图;

[0075] 图 6 是根据本发明的一个实施例的用于检查间接带隙半导体结构的方法的流程图;以及

[0076] 图 7 是根据本发明的另一个实施例的用于检查间接带隙半导体结构的系统的方框图。

具体实施方式

[0077] 本发明公开了用于检查间接带隙半导体结构的方法和系统。在下面的描述中阐述了许多细节,包括间接带隙半导体结构、图像捕获设备等等。然而,本领域技术人员从本公开内容可以明显看出,在不偏离本发明的范围和精神的情况下可以做出修改和/或替换。在其他情况下,可以省略特定细节以免模糊本发明。

[0078] 在附图中提到了具有相同或类似附图标记的步骤和/或功能,除非另有目的,否则所述步骤和/或特征对于本说明书而言具有相同的功能或操作。

[0079] 在本说明书的上下文中,“包括”一词具有开放性而非排他性的含义:即主要包括

而不必是仅仅包括。与“包括”一词类似的其他表达方式也具有相应的含义。

[0080] 1、介绍

[0081] 本发明的实施例提供用于检查间接带隙半导体结构的检查系统和方法，所述结构包括裸晶片或者部分处理过的晶片。特别地，所述系统和方法特别适用于测试硅结构，其中包括：裸晶片或部分处理过的晶片，部分制造的硅器件，裸绝缘体上硅（SOI）结构或部分处理过的绝缘体上硅结构，以及完全制造的硅器件。所述系统和方法能够在处理之前并且在一直到完成的半导体器件的各处理阶段当中（包括已经被部分地金属化的器件）无接触地检测存在于裸晶片中的缺陷。所谓的无接触是指不需要电接触。例如，本发明的实施例可以检查硅结构并且识别出缺陷，而如果没有被识别出的话，所述缺陷可能导致所述结构成为报废的太阳能电池或其他光电器件。所述系统和方法还能够在各处理步骤之后无接触地确定空间分辨的材料参数，比如局部缺陷密度、局部旁路、局部电流-电压特性、局部扩散长度以及局部少数载流子寿命。本发明的实施例利用在间接带隙半导体结构的大面积上同时引发的电致发光（PL）来表征所述间接带隙半导体结构。

[0082] 在本发明的实施例中，取代分析所述光致发光的光谱内容，使用光致发光信号的空间变化来获得关于所述间接带隙半导体材料的质量的信息。由于本发明的实施例特别适用于硅，因此下面的描述将参照硅结构，其中包括硅晶片。然而，根据本公开内容，本领域技术人员将认识到可以针对其他间接带隙半导体（比如锗和硅锗合金）来实践本发明的实施例。所述用于检查硅结构的系统和方法可以允许在适用于工业应用的速率下（比如大约每秒钟 1 个晶片）检查晶片。

[0083] 在本发明的实施例中，生成适于在硅中引发光致发光的光，并且使用所述光来基本上均匀地照射硅样品的大面积。术语“基本上均匀”被用来描述所述光，其也可以同样被称作是均匀的，这是因为就实际情况而言，照射并不是完全均匀的。例如，单色光或者基本上单色的光（例如来自激光器或激光二极管）或者来自宽光谱光源（例如闪光灯）的经过部分滤波的光可以被用来照射所述硅样品。特别地，对所生成的光应用短通滤波，以便大大减少所述光中的高于指定波长的光谱内容。与所述光源相组合地使用一种光学设置来均匀地照射所述晶片的大面积。优选地，均匀地照射将被研究的整个晶片面积。利用能够同时捕获所引发的光致发光的图像捕获设备来捕获由所述基本上均匀的同时入射光在所述硅结构中同时引发的光致发光。所述图像捕获设备优选地包括聚焦元件以及光敏电子元件的焦平面阵列。所述光敏电子元件的焦平面阵列可以包括电荷耦合器件（CCD）阵列。所述焦平面阵列可以由硅制成。然而，如下所述，在不偏离本发明的范围和精神的情况下，还可以实践除了 CCD 阵列之外的其他器件。可以与光学成像和 / 或滤波设置相组合地使用所述图像捕获设备。

[0084] 在本发明的一些实施例中，利用所述光源从一侧照射所述硅晶片，并且从该硅晶片的另一侧捕获由所述入射光在该晶片的大面积内所引发的光致发光。在其他实施例中，从所述硅晶片被照射的同一侧捕获所述光致发光。随后对所捕获的 PL 图像应用成像和图像处理技术。通过分析所述数据允许利用在所述大面积内所引发的光致发光的空间变化来确定所述硅结构内的局部材料参数。这样可以允许在器件制造过程中的较早阶段识别出存在缺陷的硅结构，以便报废那些最终将被报废的结构。

[0085] 虽然本发明的实施例适用于工业应用，但是所述方法和系统也可以被应用于科学

研究。光致发光图像例如可以被用来确定缺陷较多的区域、局部旁路、局部电流 - 电压特性、局部扩散长度和 / 或局部少数载流子寿命,这可能不仅仅在光电领域内是有益的,而且在诸如微电子等领域内也是有益的。本发明的实施例可以被应用在无接触模式下,因此特别适用于在各单独处理步骤之后检查局部材料参数。下文中更加详细地描述了本发明的实施例。

[0086] 2、检查间接带隙半导体结构

[0087] 图 6 是示出了检查间接带隙半导体结构的方法 600 的高级流程图。在步骤 610 中,处理开始。在步骤 612 中,生成适用于在所述间接带隙半导体结构内引发光致发光的光。在步骤 614 中,对所述光进行短通滤波,以便减少所生成的光中的高于指定发射峰值的长波长光。在步骤 616 中,对所述光进行准直。还可以按照相反的顺序实施步骤 614 和步骤 616。在步骤 618 中,利用所述经过准直以及短通滤波的光基本上均匀地且同时地照射所述间接带隙半导体结构的大面积。在步骤 620 中,利用能够同时捕获所引发的光致发光的图像捕获设备来捕获由入射在所述间接带隙半导体结构的所述大面积上的基本上均匀的同时照射所同时引发的光致发光的图像。在步骤 622 中,对所述光致发光图像进行图像处理,以便利用在所述大面积内所引发的所述光致发光的空间变化来量化所述间接带隙半导体结构的指定电子特性。所述处理随后在步骤 622 中终止。在下文中参照实现了用于检查间接带隙半导体结构的各个系统的几个实施例来详细说明前述用于检查所述间接带隙半导体结构的方法。

[0088] 3、在相对两侧上的照射和成像

[0089] 图 1 示出了用于检查硅结构 140 的系统 100,所述硅结构优选地是硅晶片。可以通过多个阶段在这种硅晶片上制造光电器件和微电子器件。图 1 的系统 100 可以被用来检查裸晶片或者部分处理过的晶片(即已经经历了任何数目的处理步骤的晶片,以便形成诸如太阳能电池或微电子器件之类的光电器件),并且从所述制造工艺得到完成的器件。例如,所述硅晶片 140 的尺寸可以是 150mm×150mm×0.25mm。所述结构可以包括裸绝缘体上硅(SOI)结构或者部分处理过的绝缘体上硅结构,其具有对于入射光而言是透明的基板。所述检查方法可以在室温下执行。为了易于讨论,所述硅结构在下文中被简单地称作硅样品。

[0090] 所述系统 100 包括光源 110、短通滤波器单元 114 以及图像捕获设备 122。该短通滤波器单元 114 可以包括一个或多个短通滤波器。短通滤波器令激发光通过,并且吸收或者反射所不需要的(多个)长波长发射。短通滤波器的例子包括有色滤波器和电介质干涉滤波器。或者还可以使用电介质反射镜(例如在 45 度下),其发射将被使用的该部分光,并且透射所不需要的长波长光。所述短通滤波器单元还可以包括短通滤波器与电介质反射镜的组合。

[0091] 所述系统还包括准直器 112,并且可以包括均匀化器 116,所述均匀化器是一种用于把具有非均匀强度的经过准直的光束转换成垂直入射到所述准直光束的平面的均匀受照区域的设备。其例子包括(多个)交叉圆柱透镜阵列以及微透镜阵列。准直器可以是各种类型的透镜。在图 1 的实施例中,所述系统 100 的元件被如下设置:面向硅样品 140 的光源 110、准直器 112、短通滤波器单元 114 以及均匀化器 116 按照所提到的顺序光学地对准。在本发明的另一个实施例中,准直器 112 和短通滤波器单元 114 的排序可以反转。场透镜 117 可以被使用在所述均匀化器与所述硅样品之间。所述各元件与硅样品 140 间隔开,从而

可以均匀地照射该样品 140 的大面积。

[0092] 所述光源 110 生成适于在所述硅样品 140 的大面积上同时引发光致发光的光。所生成的光的总光学功率可以超出 1.0 瓦特。具有更高功率的光源能够更加快速地在硅样品 140 内引发强度更高的光致发光。光源 110 可以生成单色光或者基本上单色的光。光源 110 可以是至少一个激光器。例如,808nm 二极管激光器可以被用来生成单色光。还可以实践具有不同主波长的两个或更多个激光器。另一种光源 110 可以包括与适当滤波相组合的宽光谱光源(例如闪光灯),以便提供部分滤波的光。另一种光源 110 可以是高功率发光二极管(LED)。另一种光源 110 可以包括发光二极管(LED)阵列。例如,这种 LED 阵列可以在具有散热的紧致阵列中包括大量(例如 60 个)LED。在不偏离本发明的范围和精神的条件下还可以实践其他高功率光源。

[0093] 通过准直器或准直器单元 12 把来自所述光源 110 的光准直成平行光束,其中所述准直器单元可以包括一个以上的元件。对所生成的光应用短通滤波。这可以利用包括一个或多个滤波器元件的干涉短通滤波器单元 114 来实现。对所生成的光进行短通滤波可以减少高于指定发射峰值的长波长光。所述短通滤波器 114 可以把所生成的光的长波长拖尾中的总光子通量减少了大约十倍或更多。所述长波长拖尾可以开始于比所述光源 110 的最长波长发射峰值高大约百分之十(10%)的波长。例如,所述滤波可以去除不想要的光谱分量,比如其波长处于 900nm 到 1800nm 的范围内或者处于该范围的一个子范围内的红外分量。可以使用多个短通滤波器,这是因为一个滤波器本身可能不足以去除或者减少不想要的光谱分量。所述短通滤波器可以被实现在所述光源 110 与硅样品 140 之间的总体光学元件组合中的多个不同位置处。例如,滤波器可以位于所述均匀化器 116 与场透镜 117 之间。如果使用一个以上的短通滤波器,则可以把一个或多个所述滤波器设置成使其相对于所述准直光束的光轴倾斜某一角度,以避免对反射光的多重反射。随后可以通过均匀化器 116 对所述经过短通滤波以及准直的光进行均匀化,以便均匀地照射所述硅样品 140 的大面积。然而,所述各步骤的排序可以被改变。所述硅样品的均匀受照面积可以大于或等于大约 1.0cm^2 。所述均匀化器 116 把所述准直光束均匀地分布在所述硅样品 140 的表面上。

[0094] 入射在所述硅样品 140 的表面的均匀照射足以在所述硅样品中同时引发光致发光。在图 1 中通过从所述硅样品 140 的相对表面发出的箭头或射线来表示该光致发光。仅仅为了易于说明,并没有示出从所述光源 110 所指向的该硅样品 140 的第一表面发出相应的光致发光。硅的外部光致发光量子效率可以非常低(大约 $< 10^{-6}$)。图像捕获设备 130 捕获在所述硅样品内同时引发的光致发光的图像。所述短通滤波器单元 114 减少或去除来自光源 110 的被所述图像捕获设备 130 所接收到的入射光。光源拖尾辐射可以大约是源峰值的 10^{-4} ,与诸如 AlGaAs 的直接带隙半导体的 PL 效率(大约是 10^{-2})相比,这可以大大超出硅的 PL 效率(大约是 10^{-6})。在该实施例中,光源 110 被指向所述硅样品 140 的一侧的表面,以便照射该表面。对于照射该硅样品 140 的所生成的光而言,该硅样品 140 充当其长通滤波器。所述图像捕获设备 130 被指向该硅样品 140 的相对侧的表面,以便从该相对侧捕获所述 PL 图像。可以与该图像捕获设备 130 相组合地使用长通滤波器单元 118。该滤波器单元 118 可以是可选的,这是因为根据晶片厚度和入射光的波长,所述硅晶片 140 可以去除来自所述光源 110 的任何残留光。该图像捕获设备 130(以及长通滤波器 118)被适当地与该图像捕获设备 130 所面向的该另一表面间隔开。

[0095] 所述图像捕获设备 130 包括聚焦元件 120 (例如一个或多个透镜) 以及光敏电子元件的焦平面阵列 122。在该实施例中, 所述光敏电子元件的焦平面阵列 122 包括电荷耦合器件 (CCD) 阵列。所述焦平面阵列可以由硅制成, 并且可以被冷却。通过冷却可以提高这种焦平面阵列的信噪比。例如, 所述图像捕获设备 130 可以是数字视频摄影机, 其具有硅 CCD 阵列并且配备有数字接口 (例如 USB 或火线 (Firewire)) 或者存储介质 (例如 DV 带或记忆棒) 以用于传送所记录的图像。或者, 所述光敏电子元件的焦平面阵列 122 可以由 InGaAs 制成。如下面参照本发明的其他实施例所描述的那样, 图像捕获设备 130 可以包括像素检测器。所述像素检测器可以是耦合到所述硅样品的相对表面的接触像素检测器。或者, 图像捕获设备 130 可以包括像素检测器或电荷耦合器件 (CCD) 阵列以及在接触模式下耦合在所述硅样品 140 的相对表面与该像素检测器或 CCD 阵列 140 或 CCD 之间的锥形光纤束。可以实践其他的图像捕获设备, 其前提是所述设备能够在所述硅样品的大面积上同时捕获所引发的光致发光。

[0096] 可以对所述 PL 图像应用图像处理技术, 以便量化所述硅样品 140 的指定电子特性。可以检查所述 PL 强度的空间变化。如图 1 所示, 通用计算机 150 可以通过通信通道 152 采集并分析由所述图像捕获设备 130 所记录的 PL 图像, 所述通信通道可以是适当的通信接口或存储设备。所述图像处理技术可以用软件、硬件或者二者的组合来实现。所述指定的电子特性可以包括下述中的一个或多个: 局部缺陷较多的区域、局部旁路、局部电流-电压特性、局部扩散长度以及局部少数载流子寿命。本发明的实施例能够无接触地确定这种属性。成像与光致发光映射不同, 后者较慢从而不适于作为在线生产工具而用于工业应用以及对 PL 的分光测试, 所述分光测试通常涉及到测试半导体的较小面积。根据本发明的该实施例的系统可以被用来识别所述晶片 140 的有缺陷的区域。本发明的实施例可以被用来在对光电器件的每一个处理步骤之后利用光致发光对所述硅结构进行无接触测试。从而可以监控各单独的处理步骤对空间材料质量的影响。

[0097] 图 4 示出了根据本发明的另一个实施例的用于检查硅结构 440 的系统 400。在该图中, 为图 4 中的与图 1 中类似的特征给出类似的参考标记 (例如图 1 的光源 110 和图 4 的光源 410 具有这种类似的附图标记)。所述结构 440 同样优选地是硅晶片。为了简化该图, 没有示出通用计算机。该系统 400 包括光源 410、高通滤波器单元 414 以及图像捕获设备 422。该系统还包括准直器 412 并且可以包括均匀化器 416。还可以采用场透镜 (未示出)。

[0098] 同样地, 所述光源 410 生成适于在所述硅样品 440 的大面积上引发光致发光的光。所生成的光的功率超出 1.0 瓦特。所能实践的光源 410 包括一个或多个激光器、与适当的滤波相组合以便提供部分滤波的光的宽光谱光源以及发光二极管 (LED) 阵列。在不偏离本发明的范围和精神的情况下还可以实践其他高功率光源。

[0099] 在该实施例中, 所述图像捕获设备包括像素检测器 442, 特别是耦合到所述硅样品 440 的与所述受照表面相对的该表面的接触像素检测器 422。该接触像素检测器 422 检测在该硅样品 440 的大面积上同时引发的光致发光。该接触像素检测器 422 可以具有比图 1 的图像捕获设备更高的收集光致发光的效率。此外, 该接触像素检测器 422 可以具有低于图 1 的 CCD 阵列的分辨率。此外, 在所述样品 440 与该接触像素检测器 422 之间可能不需要高通滤波器。该硅样品 440 可以执行该功能。

[0100] 图5示出了根据本发明的另一个实施例的用于检查硅结构540的另一种系统500。同样地,为图5中的与图1中类似的特征给出了类似的附图标记。所述结构540优选地包括硅晶片。为了简化该图,同样没有示出通用计算机。该系统500包括光源510、短通滤波器单元514以及图像捕获设备522。该系统还包括准直器512并且可以包括均匀化器516。

[0101] 在该实施例中,所述图像捕获设备包括像素检测器或电荷耦合器件(CCD)阵列522,其通过锥形光纤束560耦合到所述硅样品540的与所述受照表面相对的该表面。所述锥形光纤束560可以相对于样品尺寸把所述CCD阵列的面积减小到二分之一到三分之一并且直到大约十分之一。例如,所述CCD阵列或像素检测器可以具有60mm×60mm的尺寸。

[0102] 4、在同一侧的照射和成像

[0103] 图2示出了根据本发明的另一个实施例的用于检查硅结构240的系统200。在该图中,为图2中的与图1中类似的特征给出了类似的参考标记。所述结构240同样优选地是硅晶片。为了简化该图,没有示出通用计算机。该系统200包括光源210、短通滤波器单元214以及图像捕获设备230。该系统200还包括准直器212,并且可以包括均匀化器216。还可以采用场透镜(未示出)。

[0104] 同样地,所述光源210生成适于在所述硅样品240的大面积上均匀地引发光致发光的光。所生成的光的总光学功率超出1.0瓦特。多种光源中的任一种都可以被采用作为所述光源210。在前文中参照图1阐述了这种光源的细节。

[0105] 在图2的实施例中,所述系统200的元件被如下设置:面向硅样品240的光源210、准直器212、短通滤波器单元214以及均匀化器216按照所提到的顺序光学地对准。然而,在不偏离本发明的范围和精神的情况下还可以实践一些或者所有这些元件的其他排序。照明元件的该组合是离轴的,这是因为光源210和相关联的光学元件以小于90度的角度指向所述样品240的表面。所述元件一起与硅样品240间隔开,从而可以照射该样品240的大面积。所述图像捕获设备230(以及长通滤波器单元218)垂直指向硅样品240的表面。需要该长通滤波器单元218来去除来自所述光源210的入射光。因此,该图像捕获设备230从受到来自光源210的入射光照射以引发光致发光的同一侧捕获所述光致发光(同样由从所述硅样品240的表面发出的射线或箭头来表示)。

[0106] 所述光源210生成适于在所述硅样品中引发光致发光的光。所生成的光的总光学功率超出1.0瓦特。

[0107] 在该实施例中,所述图像捕获设备130包括聚焦元件220(例如透镜)以及光敏电子元件的焦平面阵列222。在该实施例中,所述光敏电子元件的焦平面阵列222包括电荷耦合器件(CCD)阵列。优选地,所述焦平面阵列可以由硅制成,并且可以被冷却。例如,所述图像捕获设备130可以是数字视频摄影机,其具有硅CCD阵列并且配备有数字接口(例如USB或火线)或者存储介质(例如DV带或记忆棒)以用于传送所记录的图像。或者,所述光敏电子元件的焦平面阵列222可以由InGaAs制成。如下面参照本发明的其他实施例所描述的那样,图像捕获设备230可以包括像素检测器。

[0108] 可以对所述PL图像应用图像处理技术,以便利用在所述大面积内引发的光致发光的空间变化来量化所述硅样品240的指定电子特性。所述指定的电子特性可以包括下述中的一个或多个:局部缺陷较多的区域、局部旁路、局部电流-电压特性以及局部少数载流子寿命。

[0109] 图 3 示出了根据本发明的另一个实施例的用于检查硅结构 340 的系统 300。该系统 300 也包括光源 310、短通滤波器单元 314 以及图像捕获设备 330。该系统 330 还包括准直器 312, 并且可以包括均匀化器 316。该系统还可以包括场透镜 (未示出)。所述图像捕获设备 330 可以包括聚焦元件 320 (例如透镜) 和光敏电子元件的焦平面阵列 322。还可以把长通滤波器单元 318 布置在所述摄影机 330 与所述光致发光从中发出的该表面之间。该系统 300 的元件与图 2 中的元件相同, 其不同之处在于, 光源 310 和相关联的光学元件垂直指向样品 340 的表面。图像捕获设备 330 (以及长通滤波器单元 218) 是离轴的, 这是因为该图像捕获设备 330 (以及该长通滤波器单元 218) 在小于 90 度的角度下指向样品 340 的表面。该图像捕获设备 330 从受到所述光源 310 照射以便引发从所述硅样品 340 的表面发出的光致发光 (同样由射线或箭头示出) 的同一侧捕获所述光致发光。

[0110] 与图 2 和 3 一样, 图 7 示出了用于检查硅结构 740 的系统 700, 其不同之处在于, 在该实施例中, 光源 710 和相关联的光学器件 712、714、716 以及图像捕获系统 730、722、720、718 都是与样品 740 离轴 (不垂直) 的。

[0111] 本发明的实施例可以被有利地用于间接带隙半导体, 所述间接带隙半导体不像直接带隙半导体 (比如 GaAs、AlGaAs 以及许多 III-V 族半导体) 那样高效地生成光致发光。可以照射较大的面积 (大到整个晶片面积), 以便同时引发光致发光。有利的是, 所述整个晶片被同时照射, 这样允许更快而且更一致的测试。例如, 太阳能电池通常在整個设备被照射时进行操作, 而不仅仅是所述太阳能电池的一部分被照射时进行操作。按照这种方式可以获得关于所述电池的更多定量细节。虽然参照检查晶片以识别出晶片中的缺陷这一方面描述了本发明的实施例, 但是本发明的实施例并不限于这种应用。本发明的实施例可以被使用来检查部分或完全形成的器件, 以便识别出所述器件中的缺陷。本发明的实施例在微电子工业中具有更加一般的应用。

[0112] 其中所述光源与图像捕获设备处在所述间接带隙半导体结构的相对侧或同一侧的本发明的实施例可以被用来识别裸晶片以及部分制造的半导体器件中的可能缺陷。光源与图像捕获系统的同侧配置可以被用来测试完全制造的半导体器件, 特别是在所述器件的表面被完全金属化的情况下。

[0113] 前述内容仅仅描述了根据本发明的实施例的少数几种用于检查间接带隙半导体的方法和系统。在不偏离本发明的范围和精神的情况下可以对本发明做出修改和 / 或替换。所述实施例意图是说明性而非限制性的。

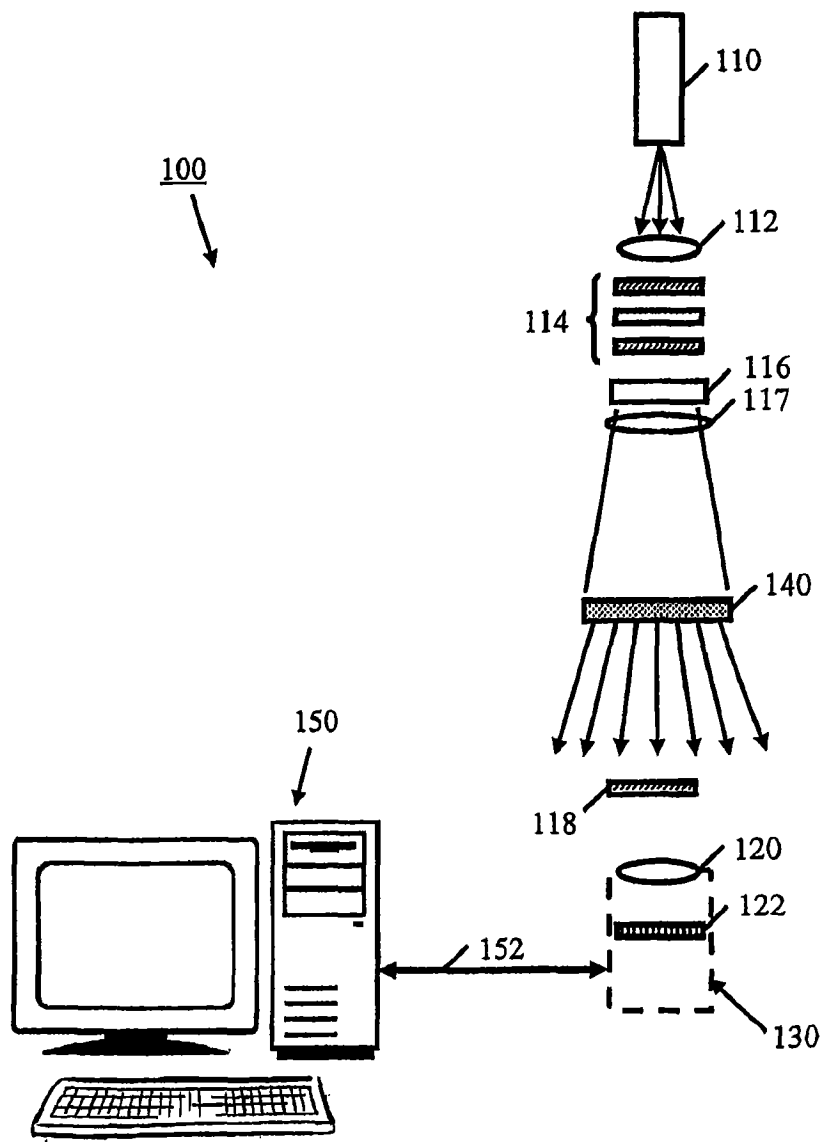


图 1

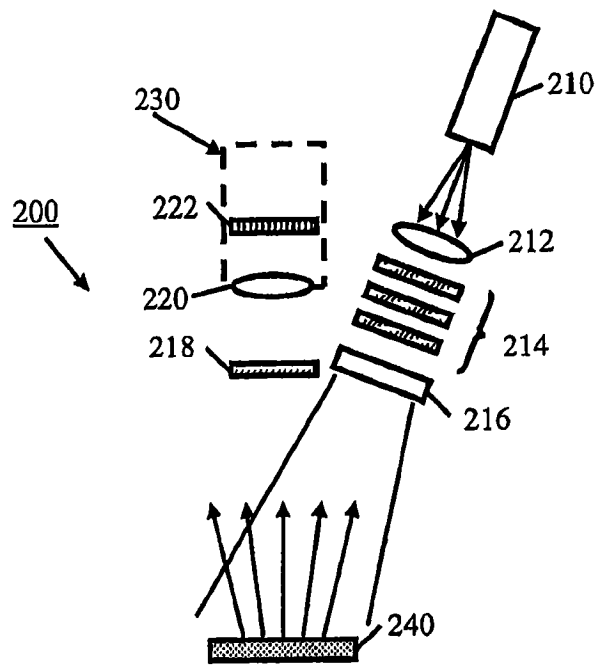


图 2

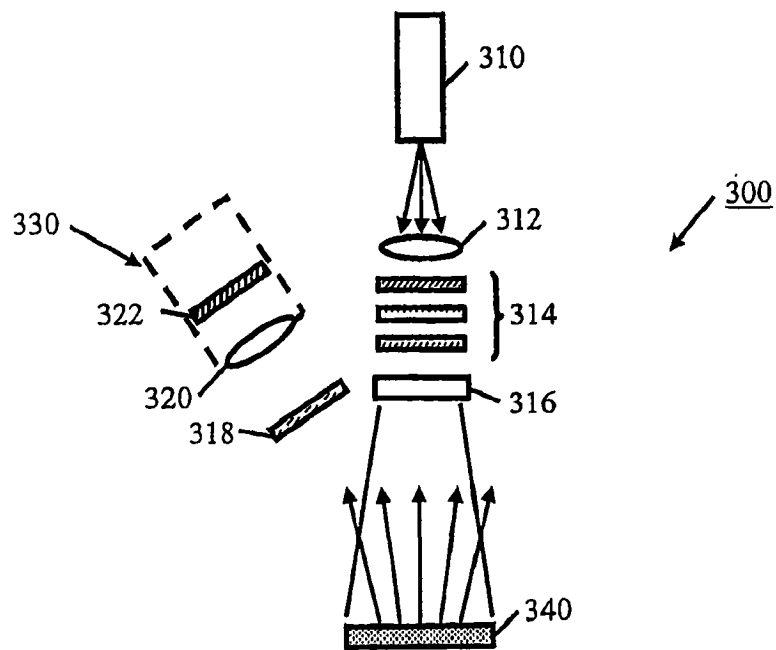


图 3

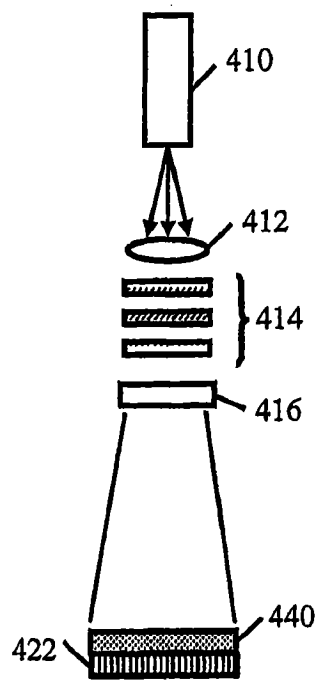


图 4

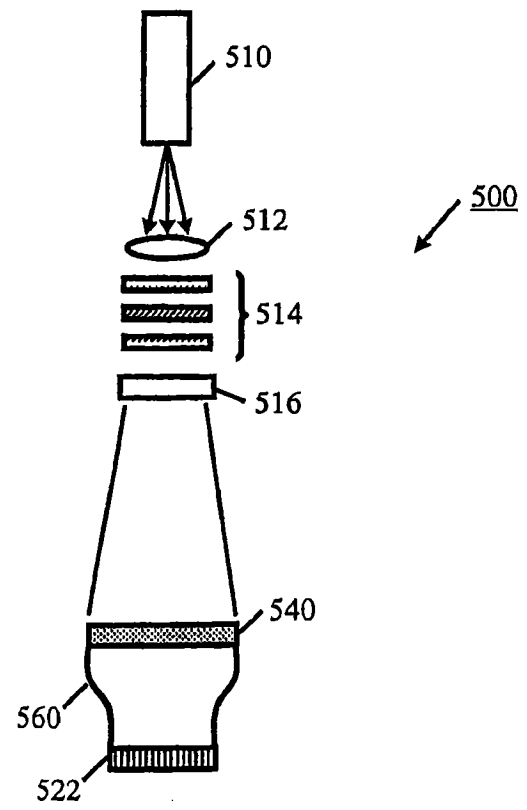


图 5

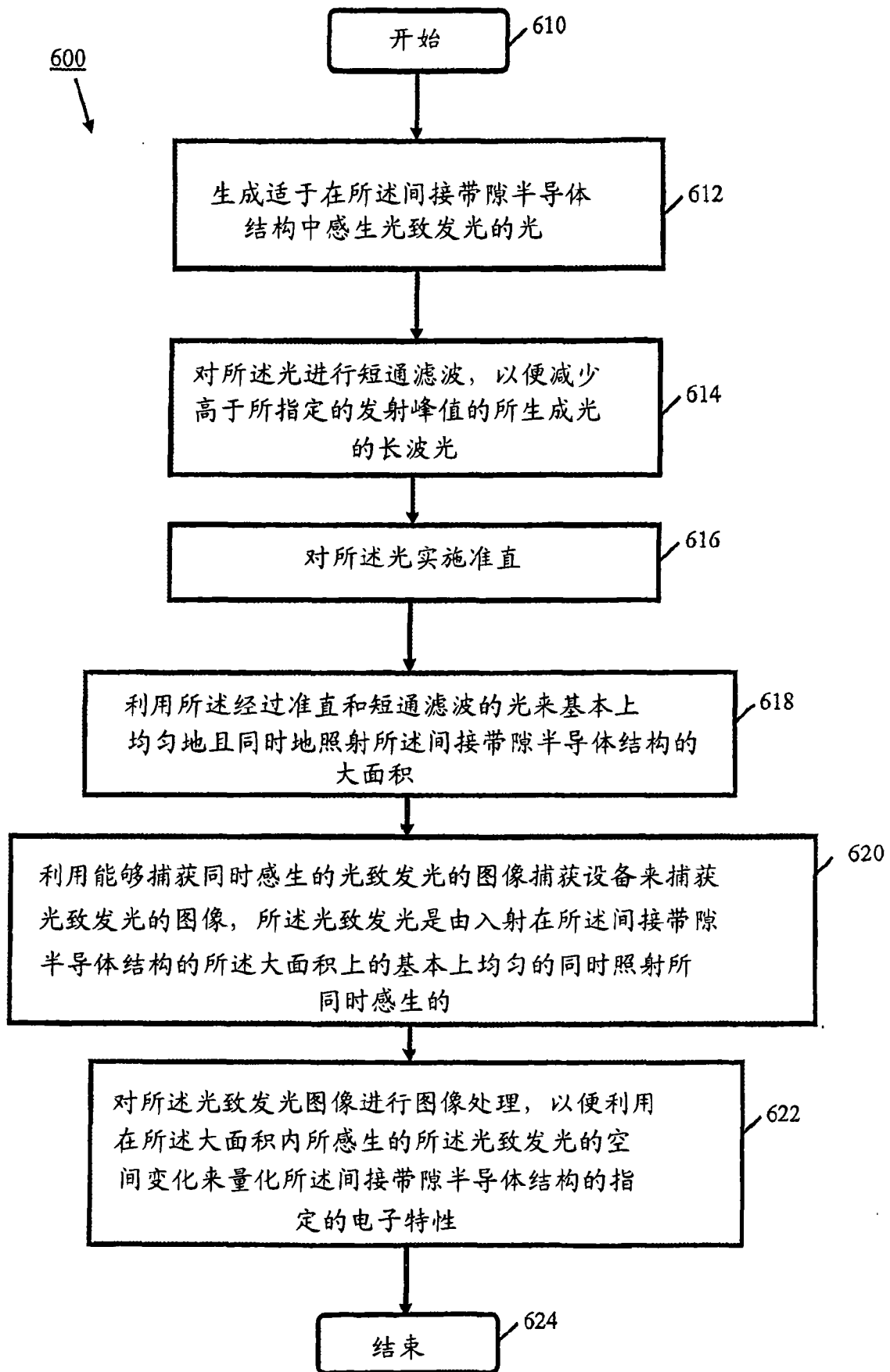


图 6

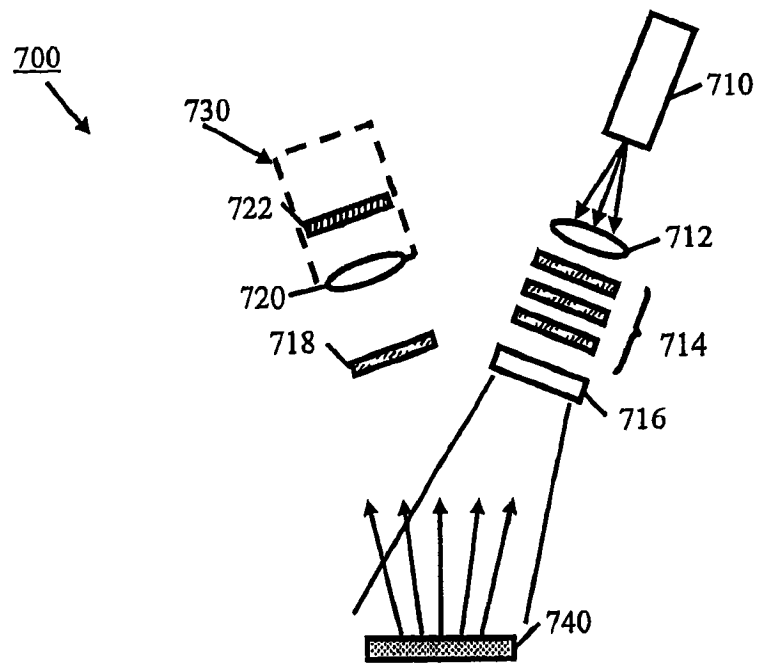


图 7