



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104020148 A

(43) 申请公布日 2014. 09. 03

(21) 申请号 201410281804. 3

H01L 21/66(2006. 01)

(22) 申请日 2010. 07. 19

(30) 优先权数据

2009903369 2009. 07. 20 AU

(62) 分案原申请数据

201080033122. 0 2010. 07. 19

(71) 申请人 BT 成像股份有限公司

地址 澳大利亚新南威尔士

(72) 发明人 托斯顿·特鲁普克

(74) 专利代理机构 北京康信知识产权代理有限

责任公司 11240

代理人 余刚 张英

(51) Int. Cl.

G01N 21/64(2006. 01)

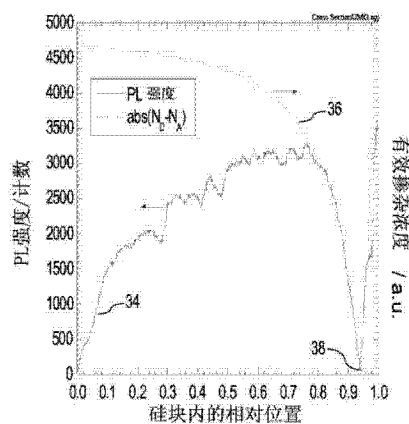
权利要求书2页 说明书18页 附图10页

(54) 发明名称

光致发光测量中掺杂浓度和少数载流子寿命分离

(57) 摘要

本发明涉及光致发光测量中掺杂浓度和少数载流子寿命分离。具体来说,本发明涉及分离由掺杂浓度和少数载流子寿命分别对半导体材料产生的光致发光(PL)的影响的方法。在一个实施方式中本底掺杂浓度以其他技术被测量,使得PL测量结果根据有效少数载流子寿命被分析。在另一个实施方式中有效寿命以其他技术被测量,使得PL测量结果根据本底掺杂浓度被分析。在又一个实施方式中,通过计算两次PL测量结果的强度比本底掺杂浓度的影响被消除,所述PL测量结果是在不同的光谱范围下被获得,或者在不同的激发波长下被产生。



1. 一种分析硅锭或硅块的方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:
 - (a) 激发所述硅锭或硅块的至少一个侧面的至少一个部位,从而产生光致发光;
 - (b) 获取至少一个所述侧面的所述至少一个部位所辐射出的光致发光的至少一张图像;以及
 - (c) 根据所述硅锭或硅块中位错面密度的变化对所述至少一张图像进行解释。
2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,对从所述锭或块的不同侧面得到的光致发光图像进行分析,从而获得随后从所述硅锭或硅块切割下来的晶片中位错面密度估算值。
3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,采用至少一张光致发光图像来突出显示用于晶片生产的所述锭或块中的劣质区域。
4. 一种分析硅锭或硅块的方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:
 - (a) 激发所述硅锭或硅块的至少一个侧面,从而产生光致发光;
 - (b) 获取至少一个所述侧面辐射出的光致发光的至少一张图像;以及
 - (c) 对所述至少一张图像进行解释,从而识别出所述锭或块中低有效和/或体少数载流子寿命区域。
5. 一种分析硅锭或硅块的方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:
 - (a) 在不同的探测波段下,获取所述硅锭或硅块的至少一个侧面的至少两次光致发光测量结果;
 - (b) 计算至少两次所述光致发光的测量结果的强度比;以及
 - (c) 根据预定理论关系式,将所述强度比转换成体寿命或体扩散长度。
6. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于,所述不同的探测波段由一台或多台电介质滤波器产生,所述方法还包括以下步骤:对所述光致发光测量结果或由于所述一台或多台电介质滤波器透射的角变化所导致的所述强度比进行归一化。
7. 一种分析硅锭或硅块的方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:
 - (a) 获取所述硅锭或硅块的至少一个侧面的具有不同激发波长的光致发光的至少两个测量结果;
 - (b) 计算至少两次所述光致发光的测量结果的强度比;以及
 - (c) 根据预定理论关系式,将所述强度比转换为体寿命或体扩散长度。
8. 根据权利要求1-7任一所述的方法,进一步包括使用光致发光测量结果或图像作为晶片生产的切割导引。
9. 根据权利要求1-7任一所述的方法,进一步包括使用通过所述方法获得的信息对硅块或硅锭的生产进行改进。
10. 根据权利要求1-7任一所述的方法,进一步包括使用通过所述方法获得的信息确定从所述硅锭或硅块中得到的晶片的价格。
11. 根据权利要求1-7任一所述的方法,进一步包括使用光致发光测量结果或图像作为晶片生产的导引,被用于将晶片分拣入质量箱。
12. 根据权利要求1-7任一所述的方法,进一步包括使用通过所述方法获得的信息获取硅晶片生产中原料质量的反馈。
13. 一种用于分析硅锭或硅块的系统,其特征在于,所述系统包括:

光探测单元,用于获取由所述硅锭或硅块至少一个侧面产生的光致发光的至少一张图像或线扫描;以及

处理器,用于根据所述硅锭或硅块中位错面密度的变化,对至少一张光致发光图像或线扫描进行解释。

14. 一种用于分析硅锭或硅块的系统,其特征在于,所述系统包括:

光探测单元,用于获取由所述硅锭或硅块至少一个侧面产生的光致发光的至少一张图像或线扫描;以及

处理器,用于解释所述至少一张光致发光图像或线扫描,从而识别在所述硅锭或硅块中具有许多缺陷的低有效和/或体少数载流子寿命的区域。

15. 一种用于分析硅锭或硅块的系统,其特征在于,所述系统包括:

光探测单元,用于在不同探测波段下,获取所述硅锭或硅块至少一个侧面产生的光致发光的至少两个测量结果;以及

处理器,用于计算至少两个所述测量结果之间的强度比,并根据预定理论关系式,将所述强度比转换为体寿命或体扩散长度。

16. 根据权利要求 15 所述的系统,其特征在于,所述系统还包括一台或多台用于提供不同的工作波段的电介质滤波器,其中,所述处理器还用于对所述测量结果或由于所述一台或多台电介质滤波器透射中角变化所导致的所述强度比进行归一化。

17. 一种用于分析硅锭或硅块的系统,其特征在于,所述系统包括:

第一激发单元和第二激发单元,用于分别发射第一激发波和第二激发波,从而使所述硅锭或硅块的至少一个侧面产生光致发光;

光探测单元,用于获取由所述第一激发波和所述第二激发波激发产生的光致发光的第一测量结果和第二测量结果;以及

处理器,用于计算所述第一测量结果和所述第二测量结果之间的强度比,并根据预定理论关系式将所述强度比转换为体寿命或体扩散长度。

18. 根据权利要求 13-17 任一所述的系统,其特征在于,还包括:

光源,用于发射波长大于硅或所述半导体材料带隙宽度的光波;以及

探测器,用于探测所述光波对所述硅或半导体材料的透射。

19. 根据权利要求 13-17 任一所述的系统,其特征在于,所述光探测单元包括一个镓砷相机。

20. 根据权利要求 13-17 任一所述的系统,其特征在于,所述光探测单元包括一个硅相机。

21. 一种用于执行根据权利要求 1-7 任一所述的方法的系统。

光致发光测量中掺杂浓度和少数载流子寿命分离

[0001] 本申请是申请日为 2010 年 7 月 19 日的题为“半导体材料光致发光测量中掺杂浓度和少数载流子寿命分离”的中国专利申请号 201080033122.0 的分案申请。

技术领域

[0002] 本发明涉及通过光致发光测量法表征半导体材料的特性,具体为涉及一种对由掺杂浓度和少数载流子寿命分别对光致发光信号产生的影响进行分离的技术。本发明主要改进了对于块状(非晶片)硅样品的特性表征,但本发明的改进并不仅仅局限于这一特定的使用领域。

背景技术

[0003] 采用商用晶片的太阳能电池通常由尺寸为 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 至 $22 \times 22 \text{cm}^2$ 的硅晶片制成。多晶硅铸块 2(也称为硅锭)如图 1 所示,常规尺寸为 $1 \times 1 \times 0.7 \text{m}^3$,将其切割成截面为正方形($10 \times 10 \text{cm}^2$ 至 $22 \times 22 \text{cm}^2$)的条块 4(俗称为硅块),然后再切割成独立的硅晶片,每一片硅晶片的厚度通常为 $120\text{--}250 \mu\text{m}$ 。硅锭通常被切割成 4×4 或 5×5 的硅块。太阳能电池通过采用不同的多晶硅锭或单晶硅锭的生长技术由多晶硅或单晶硅制成。

[0004] 对于晶片制造商来说,出于利益的考虑需要表征切片以前的硅锭或硅块的电子及结构特性。众所周知,多晶(mc)硅锭铸件的在硅的外侧部位中掺杂浓度增大了,所述外侧部位为硅锭的底部、顶部或侧面。在硅锭底部和侧面上,该掺杂浓度的增大是由于坩埚壁中的杂质向硅锭扩散而形成的,而在硅锭顶部,掺杂浓度的增大是由于在硅锭结晶过程中杂质向顶部液相分凝而形成的。杂质浓度的增大导致了电子材料质量的降低,表现为有效少数载流子寿命的降低。图 2 从侧面描述了多晶硅锭铸件中典型的有效少数载流子寿命分布,即有效寿命高的材料 8 主要分布在硅锭的中心区域,而有效寿命低的材料 10 则分布在硅锭的顶部、底部和边缘。

[0005] 目前,正在使用的用于表征硅块的实验性技术包括红外线透视法及少数载流子寿命扫描法。在红外线透视技术中,次能带隙的光透射过硅块是采用红外线照相机从不同的方向来测量的,其中,所述相机对于次能带隙光谱范围(对于硅来讲,波长大于 1100nm)较为敏感,从而提供诸如碳化硅(SiC)和氮化硅(Si_3N_4)的杂质浓度和位置的三维信息。

[0006] 目前,有效少数载流子寿命可以通过几种实验性技术进行测量,这些技术包括瞬态和准稳态光电导(QSSPC)法和微波光电导衰减($\mu\text{-PCD}$)法。这些技术手段测量出的有效少数载流子寿命,是受硅块材料质量(如体少数载流子寿命)和表面复合影响的有效样品的特性参数。尤其是对于非钝化的表面,如切割的晶片,有效寿命通常很大程度上受到表面复合的影响或取决于表面复合。有效寿命横向变化的二维信息,如在硅块的某一表面上,可以通过采用上述方法在扫描模式下获得,并通过手动或自动形式的点对点扫描,从而生成布局图。在一些情况下,如采用准稳态光电导法,测出的有效寿命值可以在有限范围内通过体寿命与有效寿命之间的预定关系转换为体寿命值。

[0007] 尽管有效少数载流子寿命值比较容易测得,但体少数载流子寿命值对于光伏应用

来说是更为重要,这是因为:(a) 通过去除低寿命的表面材料并将表面钝化可以显著降低表面复合的影响;(b) 不同于非钝化样品的有效寿命,体寿命值决定了太阳能电池成品的电压和电流。因此,特别是对于具有高表面复合的非钝化样品,将测得的有效寿命值转换为体寿命值是很重要的。

[0008] 注入水平是决定少数载流子寿命的另一个重要因素。体寿命由多种复合机制决定,包括缺陷复合、辐射复合和俄歇复合。通过这些机制复合的复合率与少数载流子浓度成非线性关系,因此体少数载流子寿命本身取决于少数载流子的浓度。理想状态下,少数载流子寿命的实验数值为注入水平的函数,无论该寿命值是面积平均的或空间分辨的。然而,用具有两个独立参量(位置和注入水平)的函数表征数据较为困难,空间分辨数据如寿命图像或寿命分布图通常仅仅用来表示各个点的单独注入水平。

[0009] 在基于硅晶片的光伏产业中使用高纯度冶金级硅可以显著降低成本。高纯度冶金级硅锭和硅块的显著特性在于:由于原料中掺杂了大量(高浓度)的磷和硼,本底掺杂浓度呈现出从硅锭的底部至顶部的反转。由于这些掺杂质具有不同的分凝系数,其掺入晶体的速度也不同。因此,高纯度冶金级硅锭通常在其底部形成 p 型,而在其顶部形成 n 型,实现了位于底部和顶部之间所谓“补偿区域”的无掺杂或极轻度掺杂。由于来自该区域的硅晶片以及来自于上述区域的上部的 n 型硅晶片不能用于采用 n 型硅晶片常规网版印刷的太阳能电池生产线中,因此需要一种可以快速获得过渡区域位置和形状信息的方法。

[0010] 在题为“检测间接带隙半导体结构的方法和系统”的 PCT 专利申请 WO 2007/041758 A1 中,公开了一种利用光致发光图像法测量硅晶片有效寿命的方法,该文献在此作为引用文献。半导体材料光致发光图像中可测的光强取决于自激辐射率 r_{sp} ,通常假定其与电子(n)浓度和空穴(p)浓度的乘积成线性关系,即 $r_{sp} = B * n * p$,其中系数 B 学术上称之为辐射复合率。光致发光图像法应用在硅样品,特别是其非钝化表面时,通常为低注入水平情况,即非平衡少数载流子浓度 Δn 远小于本底掺杂浓度 N_d ,即 $\Delta n \ll N_d$ 。在这种情况下,整个少数载流子浓度非常近似于 Δn ,而多数载流子浓度近似于 N_d 。因此,射出的光与非平衡少数载流子浓度和本底掺杂浓度成正比,从而得到 $r_{sp} = B * \Delta n * N_d$ 。准稳态情况下,例如产生率和复合率相等时,有效少数载流子寿命与产生率 G 成反比,与少数载流子浓度成正比,即 $\tau_{eff} = \Delta n / G$,从而 $r_{sp} = B * G * \tau_{eff} * N_d$ 。对于特定光强下的光致发光强度(如给定的 G),自激辐射率与有效少数载流子寿命和掺杂浓度成正比。

[0011] 以上介绍了光致发光图像法在应用中,掺杂浓度对光致发光光强的影响,但其隐含了一个假设条件,即样品中本底掺杂浓度在横向上为常数。例如,2008 年在美国韦尔举办的第 18 届晶体硅太阳能电池及组件研讨会上,T. Trupke, R. A. Bardos and J. Nyhus 发表了“硅晶片和硅太阳能电池的光致发光图像表征”一文中,阐述了不同样品中本底掺杂浓度对绝对光强以及光致发光图像标定的影响。对于许多常用的硅晶片(如商用铸件多晶硅片),可以假设在横穿样品的区域内本底掺杂浓度为常数,从而在样品的表面性能(织构化和防反射层)充分同性的情况下,可以根据非平衡少数载流子浓度的横向变量 Δn 来解释光致发光图像。

[0012] 但对于一些类型的样品,本底掺杂浓度横向上为常数的假设不成立。这些类型的样品包括:

[0013] (i) 常规多晶硅块或硅锭侧面。典型多晶硅块和硅锭中掺杂浓度的变化量 $N_D(x)$

通常很大。很多情况下,沿生长方向掺杂浓度的变化量可以由 Scheil 方程表示,其中所述方程考虑到了来自对凝固中的硅块铸件两相中杂质热力学势

$$[0014] \quad N_D(x) = N_D(0) \cdot K_{eff} (1-x)^{K_{eff}-1}$$

[0015] 方程中, K_{eff} 为主要掺杂原子和晶核的特性参数, x 为硅块或硅锭内的相对高度(底部为 $x = 0$, 顶部为 $x = 1$)。例如,对于典型的高度为 25cm 的硼掺杂(p型)硅锭或硅块,通常从底部到顶部,掺杂浓度会相对增长 30% -40%。

[0016] (ii) 高纯度冶金级硅块的侧面,或其他有意或无意掺杂-补偿硅锭或硅块。在有效 p 型掺杂到 n 型掺杂的过渡区域中,有效掺杂浓度发生了显著的变化。

[0017] (iii) 高纯度冶金级硅块制成的晶片。由于位于晶体正面附近的固-液分界面通常为曲面,所以由 p 型向 n 型过渡的区域并非严格平行于硅锭切割晶片的方向。因此,对于过渡区域附近晶片,其掺杂浓度有着显著的变化,其中一些晶片甚至呈现了在一片晶片内部 p 型到 n 型的转变。

[0018] (iv) 通过丘克拉斯基法(Cz)生长得到的单晶硅锭的垂直样品。本底掺杂浓度的垂直变化量可以在从硅锭垂直切割下来的晶片上获得到 PL 图像或硅锭的光致发光图像上显示。

[0019] (v) 单晶硅晶片,特别是 n 型 Cz 法得到的硅晶片,掺杂浓度常常呈现圆形变化(条纹)。由于有效寿命在表面受到限制,且在晶片的区域内几乎为常数,上述所呈现的圆形的变化可以从非钝化硅晶片的发光图像中被清楚地看到。甚至是掺杂浓度的微小变化在发光图像中也是清晰可见的。

[0020] (vi) 许多其他新式的、外来形式的硅锭生产过程将逐渐发展为主流生产工序。例如,包括 BP 太阳铸件“单晶”工序和 Muto 直接化学成型工序。各种生产晶体硅块的新工序将在杂质浓度和寿命变化方面具有特质。

[0021] 若不再假设本底掺杂浓度为常数,则光致发光图像中的浓度变化由 1) 掺杂浓度和 2) 有效少数载流子寿命的乘积决定。为了获得上述两个参量中其中一个空间变量的可靠信息,需要对另一参量的绝对或相对变量的光致发光信号进行修正或校正,而该参量可以直接测得或推算出。

发明内容

[0022] 本发明的其中一个目的是为了克服或改善至少一项现有技术中的缺陷,或提出有益的备选方案。本发明的另一个目的在于以其优选形式,利用光致发光测量法,提出了改进对半导体材料,尤其是体硅样品表征的方法。

[0023] 作为第一方面,本发明提出了一种分析半导体材料的方法,所述方法包括以下步骤:(a) 激发所述材料从而产生光致发光;(b) 测量由所述材料辐射出的光致发光强度;(c) 对测得的光致发光强度进行关于所述材料本底掺杂浓度变化的归一化,从而获得归一化的光致发光强度;以及(d) 根据所述材料的一项或多项特性分析所述归一化的光致发光强度。

[0024] 优选地,所述材料的实质区域被激发,并且所述测量步骤对从所述区域内发出的光致发光进行成像。在优选实施方式中,所述材料为硅锭或硅块,并且所述方法适用于所述锭或块的至少一个侧面。在优选实施方式中,所述本底掺杂浓度通过实验方法测得。或者,

所述本底掺杂浓度根据经验来被确定,或通过理论关系式计算得到。优选地,所述归一化的光致发光强度被解释为所述材料的有效少数载流子寿命的量度。或者,根据体寿命和归一化光致发光强度之间的预定理论关系式,将所述归一化光致发光强度转化为所述材料的体少数载流子寿命量度。在优选实施方式中,所述理论关系式被用于所述材料的多个具有相似表面处理的样品。在其他优选实施方式中,所述特性为所述材料中位错的面密度或体密度。

[0025] 作为第二方面,本发明又提出了一种分析硅锭或硅块的方法,所述方法包括以下步骤:(a) 激发所述硅锭或硅块的至少一个侧面的至少一个部位,从而产生光致发光;(b) 获取至少一个所述侧面的所述至少一个部位所辐射出的光致发光的至少一张图像;以及(c) 根据所述硅锭或硅块中位错面密度的变化对所述至少一张图像进行解释。优选地,对从所述锭或块的不同侧面得到的光致发光图像进行分析,从而获得随后从所述锭或块切割下来的晶片中心位错面密度估算值。优选地,采用至少一张光致发光图像来突出显示用于晶片生产的所述锭或块中的劣质区域。

[0026] 作为第三方面,本发明又提出了一种分析硅锭或硅块的方法,所述方法包括以下步骤:(a) 激发所述硅锭或硅块的至少一个侧面,从而产生光致发光;(b) 获取至少一个所述侧面辐射出的光致发光的至少一张图像;以及(c) 对所述至少一张图像进行解释,从而识别出所述锭或块中低有效和/或体少数载流子寿命区域。

[0027] 作为第四方面,本发明又提出了一种分析半导体材料的方法,所述方法包括以下步骤:(a) 激发所述材料的一个部位,从而产生光致发光;(b) 对所述部位辐射出的光致发光分布进行测量;(c) 对测得的光致发光的分布进行关于所述部位有效少数载流子寿命变化的归一化;以及(d) 根据所述部位的所述材料本底掺杂浓度的变化,对归一化后的光致发光分布进行分析。

[0028] 优选地,所述材料为硅锭或硅块,并且所述方法被应用于所述锭或块的至少一个侧面。所述部位优选为线扫描或二维区域。所述方法优选应用于高纯度冶金级的硅锭、硅块或晶片。优选地,对所述光致发光分布的最小位置进行拟合,获得所述高纯度冶金级硅的原料中施主浓度和受体浓度的比率。优选地,对根据有效寿命变化的归一化步骤进行省略,并根据本底掺杂变化对光致发光分布进行解释。优选地,通过所述光致发光分布中的最小位置来识别在高纯度冶金级硅中由p型向n型过渡的区域的位置。

[0029] 作为第五方面,本发明又提出了一种分析硅锭或硅块的方法,所述方法包括以下步骤:(a) 在不同的探测波段下,获取所述硅锭或硅块的至少一个侧面的至少两次光致发光测量结果;(b) 计算至少两次所述光致发光的测量结果的强度比;以及(c) 根据预定理论关系式,将所述强度比转换成体寿命或体扩散长度。优选地,所述不同的探测波段由一台或多台电介质滤波器产生,所述方法还包括以下步骤:对所述光致发光测量结果或由于所述一台或多台电介质滤波器透射的角变化所导致的所述强度比进行归一化。

[0030] 作为第六方面,本发明又提出了一种分析硅锭或硅块的方法,所述方法包括以下步骤:(a) 获取所述硅锭或硅块的至少一个侧面的具有不同激发波长的光致发光的至少两个测量结果;(b) 计算至少两次所述光致发光的测量结果的强度比;以及(c) 根据预定理论关系式,将所述强度比转换为体寿命或体扩散长度。

[0031] 本发明的上述所提出的任一方法或系统,其中,光致发光测量结果或图像优选为

被用于晶片生产的切割导引并用于将晶片分拣入质量箱。或者通过所述方法获得的信息被用于对硅块或硅锭的生产进行改进,或被用于确定从所述材料中得到的晶片的价格或被用于获取硅晶片生产中原料质量的反馈。

[0032] 作为第七方面,本发明又提出了一种用于分析半导体材料的系统,所述系统包括:光探测单元,用于获取由所述材料表面产生的光致发光的至少一张图像或线扫描;以及处理器,用于对所测得的光致发光强度进行关于所述表面的本底掺杂浓度变化的归一化,并根据所述材料的一项或多项特性对归一化后的光致发光强度进行分析。

[0033] 作为第八方面,本发明又提出了一种用于分析硅锭或硅块的系统,所述系统包括:光探测单元,用于获取由所述硅锭或硅块至少一个侧面产生的光致发光的至少一张图像或线扫描;以及处理器,用于根据所述硅锭或硅块中位错面密度的变化,对至少一张光致发光图像或线扫描进行解释。

[0034] 作为第九方面,本发明又提出了一种用于分析硅锭或硅块的系统,所述系统包括:光探测单元,用于获取由所述硅锭或硅块至少一个侧面产生的光致发光的至少一张图像或线扫描;以及处理器,用于解释所述至少一张光致发光图像或线扫描,从而识别在所述硅锭或硅块中具有许多缺陷的低有效和/或体少数载流子寿命的区域。

[0035] 作为第十方面,本发明又提出了一种用于分析半导体材料的系统,所述系统包括:光探测单元,用于获取由所述材料表面产生的光致发光的至少一张图像或线扫描;以及处理器,用于对所述图像或线扫描各部分中测得的光致发光强度进行关于所述表面的有效少数载流子寿命变化的归一化,以及根据所述表面的本底掺杂浓度的变化对归一化后的光致发光图像或线扫描进行分析。

[0036] 作为第十一方面,本发明又提出了一种用于分析硅锭或硅块的系统,所述系统包括:光探测单元,用于在不同探测波段下,获取所述硅锭或硅块至少一个侧面产生的光致发光的至少两个测量结果;以及处理器,用于计算至少两个所述测量结果之间的强度比,并根据预定理论关系式,将所述强度比转换为体寿命或体扩散长度。优选地,所述系统还包括一台或多台用于提供不同的工作波段的电介质滤波器,其中,所述处理器还用于对所述测量结果或由于所述一台或多台电介质滤波器透射中角变化所导致的所述强度比进行归一化。

[0037] 作为第十二方面,本发明又提出了一种用于分析硅锭或硅块的系统,所述系统包括:第一激发单元和第二激发单元,用于分别发射第一激发波和第二激发波,从而使所述硅锭或硅块的至少一个侧面产生光致发光;光探测单元,用于获取由所述第一激发波和所述第二激发波激发生成的光致发光的第一测量结果和第二测量结果;以及处理器,用于计算所述第一测量结果和所述第二测量结果之间的强度比,并根据预定理论关系式将所述强度比转换为体寿命或体扩散长度。

[0038] 优选地,根据本发明第七至第十二任一方面所述的系统,还包括:光源,用于发射波长大于硅或所述半导体材料带隙宽度的光波;以及探测器,用于探测所述光波对所述硅或半导体材料的透射。

[0039] 在本发明第七至第十二任一方面中,所述光探测单元优选包括一个硅相机。或者,所述光探测单元包括一个铟镓砷相机。

[0040] 根据本发明的第十三方面,提出了一种用于执行根据第一至第六方面任一所述的

方法的系统。

附图说明

[0041] 对于与本发明相关的现有技术来说,通过随后的典型实施方式描述和附加权利要求,并结合相应的附图,本发明的优点和优势将更为明显,其中:

[0042] 图 1 是将硅锭切割成硅块或晶片的切割示意图;

[0043] 图 2 是硅锭的横截面图,阐明了有效少数载流子寿命的典型变化;

[0044] 图 3 是常规铸造多晶 p 型硅块侧面的 PL 图像

[0045] 图 4 是多晶 UMG 硅块侧面的 PL 图像;

[0046] 图 5(a) 和图 5(b) 是厚度为 15cm 的硅块,在两束不同激发波长(即不同吸收系数)照射下并对应不同体寿命值,计算得出的过剩载流子浓度的分布图。

[0047] 图 6 是厚度为 15cm 的硅块(圆点)和厚度为 200 μm 的硅晶片(方点)对应的归一化 PL 计数速率和体少数载流子寿命的理论关系;

[0048] 图 7 是厚度为 15cm 的硅块,在两次不同光谱范围下进行 PL 测量,探测到的 PL 强度对体寿命的绘图,以及强度比;

[0049] 图 8(a) 至图 8(e) 阐明 p 型硅块的初始 PL 图像(图 8(a))到体寿命图像(图 8(e)) 的转换;

[0050] 图 9 是厚度为 15cm 的硅块由两次不同激发波长产生的 PL 的强度比对体寿命的绘图;

[0051] 图 10 是图 4 中硅块从底部到顶部的 PL 强度的线扫描,以及计算得到的有效掺杂浓度;

[0052] 图 11 阐明扩展样品产生的 PL 辐射如何以一定的入射角范围冲击光滤波器;

[0053] 图 12(a) 至图 12(d) 和图 13(a) 至图 13(d) 阐明由于介质滤波器透射的入射角相关性,对 PL 强度比图像进行的修正;以及

[0054] 图 14(a) 和图 14(b) 阐明在不同光谱范围下的 PL 测量得到的强度比图像(图 14(a))到体寿命图像(图 14(b)) 的转换。

具体实施方式

[0055] 接下来根据相应的附图,以举例的方式阐述本发明的优选实施方式。

[0056] 本发明主要涉及光致发光 PL 图像测量法应用于测量切割成晶片之前的“体”硅样品(如硅块和硅锭)。与晶片相比,本发明的具体优点在于可以从硅块的 PL 图像中提取体寿命信息。接下来将进一步逐一详细阐述本发明的主要构思。

[0057] 1) 利用本底杂质及其空间变化信息,对 PL 图像进行归一化处理,由此可以更为精确得到有效寿命或体寿命变化的数值信息。与测量晶片相比,采用 PL 图像测量法测量硅块/硅锭的具体优点还在于,可以确定体寿命的分布图像,特别是当注入水平被良好限定后,可以获得更大范围的体寿命数值信息。

[0058] 2) 甚至无需归一化本底掺杂浓度的变化,仅根据 PL 强度的相对变化,就足以识别样品的某一重要特性,如低寿命区域和高位错密度区域。

[0059] 3) 将在不同实验条件下,如不同光照或不同探测波长或二者的结合,获得的 PL 图

像相结合,可以消除掺杂浓度变化带来的影响,从而根据体材料参数,如体少数载流子寿命或体扩散长度,直接修正强度比。已公开的名为“利用荧光法确定少数载流子扩散长度”的 PCT 申请 W02008/014537 A1 中,介绍了利用不同波长的光(通过在成像镜头前放置不同的光谱滤波器)进行探测的方法,此处作为引用文件,当该方法用于硅块或硅锭 PL 图像的探测时,还具有之前未公开的具体优点。

[0060] 4) 通过 PL 图像表征有效寿命值和本底掺杂浓度,在根据少数载流子寿命的变化归一化 PL 光谱信号测量值后,可以获得样品中本底掺杂浓度的相对或绝对变化信息。在一些情况下,无需归一化,仅从所测得的 PL 图像即可得到关于杂质变化的重要信息。

[0061] 5) 在分析体硅样品的 PL 图像时,简化了注入水平对体寿命的影响。通常在光照强度为空间常数的条件下测得典型 PL 图像,因此,对于硅晶片同一 PL 图像,不同的寿命值可以认为是在不同的注入水平下得到的。但是,在典型激发条件激发体硅样品(如硅块)获得的 PL 图像中,寿命测量值的情况就大不一样。在光照为空间常数以及平均注入水平的近似常数时,通过单张 PL 图像即可测得较大范围内的寿命值。

[0062] 本发明所述的 PL 测量技术尤其适用于切割晶片之前的硅块和硅锭的特性表征。具体的应用包括确定硅块内位错密度、采集硅块表面体寿命图像、对硅锭内由高掺杂浓度引起的低寿命区域进行定位与定量、以及测量补偿后硅块或高纯度冶金级 UMG 硅块或硅晶片中杂质的过渡区域。下面将进一步对其详细阐述,硅块和晶片的生产商可以利用这些信息改进硅锭的生产条件,或作为硅锭、硅块或晶片在切割或分拣时的导引。PL 测量技术还可以通过结合红外技术(上文介绍),从而提供关于硅块结构及其电学特性的完整信息。通过新实验系统,将 PL 成像技术与红外传输结合为一体,在生产过程中,实现硅块的一个或多个表面线下表征或取样或在线表征。

[0063] 光致发光测量可以用于改进硅锭生成条件或用作硅块或晶片的切割/分类导引的具体实施方式包括:以图像的方式表征位错分布、低寿命区域、UMG 硅块的体寿命和补偿区域,从而丢弃有缺陷的区域或改善生产条件。如图 2 所示,在切割过程中,如果硅锭中被丢弃的低寿命区域 10 越大,则最终得到的硅块就越小,从而得到更少量但高品质的硅块。

[0064] 图 3 为某一常规铸造的 p 型硅块侧面的 PL 图像,从图中可以看出,高位错密度区域和低位错密度区域(分别为深色区域 12 和浅色区域 14),由此可以估计得到将从该硅块切割下的晶片中的位错密度。通过对多个硅块面进行 PL 成像,可以对后续晶片中的位错密度作出更为可靠的估算。而对此进行的分析可以结合合适的图像处理算法来执行。一个或多个硅块表面的 PL 图像可以提供关于高位错密度区域的位置信息,并可以使晶片生产商可以仅仅基于晶片切割前的硅块的 PL 图像信息和硅块中晶片位置的知识对晶片进行分拣并装入质量箱(包括报废箱)。该信息也可以用于向晶片生产商提供关于原料品质的快速反馈。

[0065] 某一 UMG 硅块侧面的 PL 图像如图 4 所示。在靠近图像的上部可以看见深色带 16(相应的为靠近硅块上部的区域),代表 p 型向 n 型的过渡区域,该区域内有效掺杂浓度为零。因此,通过 PL 图像可以快速获得过渡区域位置的信息,从而将硅块的该部分去除(由于其不能用于生产太阳能电池),并从 n 型晶片分离出 p 型晶片。结合建模,PL 图像中深色带的位置还可用于计算原料中掺杂原子的浓度比,接下来将对其进行阐述。

[0066] 从硅块底部和顶部切割下来的晶片,以及从硅块边缘切割下的晶片,由于坍塌壁

的污染使其包含有低寿命区域,这类晶片可以用于生产低效率的太阳电池。如图 3 所示,低寿命区域 10 在 PL 图像中呈深色,因此硅块表面的一个或多个 PL 图像提供高掺杂区域的位置信息,并且可以使晶片生产商仅仅基于切割晶片前硅块的 PL 图像信息和硅块内部晶片位置的知识就能对晶片进行简单的分拣并装入质量箱(包括报废箱)。

[0067] 晶片生产商可以借助硅块侧面的体寿命图像实现的过程监测和控制,比使用未校准或有效寿命中的变化量更高效更可靠。通过此处所公开的任一种方法得到的对体寿命的测量均可以作为过程优化和调试的研发手段。测量硅块得到的体寿命信息可被用于根据所述硅块中晶片的位置,将晶片分拣装入不同的质量箱。上述将晶片装入质量箱的步骤也可基于从硅锭的一个或多个面产生的一个或多个 PL 图像中获得的信息来执行。体寿命信息还可用于原料质量的快速反馈。

[0068] 上述已公开 PCT 申请 WO 2007/041758 A1 中介绍了获取 PL 图像的基本概念。PL 成像的依据在于:利用可以激发样品发光的光照射样品实体区域,和通过如硅 CCD 成像设备的多像素探测器,对由被照射区域发出的光和/或由其环绕区域发出的光进行探测。不同于美国专利文献 7,113,276 中提到的超慢速 PL 测绘技术,本发明通过对样品表面进行连续点扫描从而得到的由汇聚激光光束照射产生的光致发光。需要注意的是,在此引用名为“非各向同性激发的材料或设备的表征”的 PCT 申请 PCT/AU2010/000577,其中提出被照射的区域和成像的区域无需重叠,而这将有利于照射样品表面的一个或多个中被选中区域,和对从被照射区域中和从未被照射区域附近辐射出的光致发光进行成像。

[0069] 如果观察者想要观察特性的二维分布,PL 的成像是很有用的,该特性可为如位错或高掺杂区域。但是,对于如硅块或硅锭一样的大型样品来说,如果想要去获得有效区域内的单张 PL 图像,PL 的成像便不再实用,而需要将两张或两张以上的单独的图像缝合形成一张合成图像。若可用光源的能量不足从而不具有足够强度来照射被要求的区域时,或要求的空间分辨率要高于单张图像时,这种缝合技术便非常必要。为了获得合成图像,则必须要对样品和相应的照射/探测系统进行扫描。可能的扫描方式包括:“分区成像”,即对小范围区域成像,然后移动样品或成像设备至下一个区域;“扫描成像”,即成像设备测量一片固定的小范围单元,但其相对于样品进行连续的前后移动扫描;或者“线扫描成像”,即对于一线性成像设备来说,在扫描时,样品的整个宽度沿样品的纵向移动。在自动模式下可以利用适当的图像处理技术来实现该缝合技术。本说明书中所使用的“PL 图像”这个语词包括单张 PL 图像和由两张或多张独立图像拼合生成的合成图像。

[0070] 在其他情况下,无需获取二维 PL 图像。例如,若将要测得的量值仅在一个方向上发生显著变化,如硅块或硅锭中的掺杂浓度,PL 线扫描通常就已经足够。PL 线扫描可以通过在单帧模式下利用线性成像设备来获得,或者在指定方向上横穿样品表面扫描点辐射源。比如,在一些情况下单次 PL 测量就已经足够来获取某一区域上平均量值。在本说明书中,发明原理主要针对于 PL 区域的成像,但其还可适用于其他形式的 PL 测量,包括线扫描与单点测量。

[0071] 1) 从 PL 图像中确定硅块和硅锭中的体寿命

[0072] 按照下列步骤,从 PL 图像中得到硅块和硅锭的体寿命图像:

[0073] (i) 测量 PL 图像;

[0074] (ii) 将各像素测得的 PL 计数速率(或强度)转换为关于空间本底掺杂浓度的变

化,或关于一些测量参数的变化的归一化的计数速率(或强度) PL_{norm} ,所述测量参数为如曝光时间、像素合并(即X方向的合并像素乘以Y方向的合并像素)、入射光强以及集光效率。

[0075] (iii) 利用预定理论关系式或经验关系式,将归一化后的图像转换为绝对体寿命图像。

[0076] 在上述公开为 WO 2007/041758 A1 的 PCT 申请中,已对步骤(i)进行了介绍,包括将同一样品表面不同部位的两张或两张以上图像合并,从而得到合成的 PL 图像。

[0077] 步骤(ii)可以基于本底掺杂浓度的实验数据来执行,或者如果产品中本底掺杂浓度可以根据理论或经验数值充分推算出,该步骤亦可被执行。在单掺杂硅中(即包含一种主要类型掺杂原子的p型硅或n型硅),本底的掺杂浓度可以利用电子和空穴的迁移列表数据从电阻率的测量结果获得,其中所述列表数据用于将电阻率转换成掺杂浓度。

[0078] 电阻率可以采用多种方法测得,包括接触测量法(四探针)和非接触测量法(如电感线圈、涡电流、表面电压)。扫描模式下,或利用多个设于不同位置的传感器,或二者的结合,这些技术(在多种技术中)可以用于提供掺杂浓度的空间分辨信息。为了减少测量时间,掺杂浓度的二维分布可以在粗空间分辨率下测得,然后该被测得的二维分布,在其数据被相应的插值或归纳后,被用于对 PL 图像进行归一化。由于长范围的电阻率变化比小规模/短范围的变化更为常见,关于本底掺杂浓度的粗空间信息在很多实际应用中就已足够。

[0079] 或者,对于硅锭或硅块的侧面,对掺杂浓度从顶部到底部进行一次或多次线扫描就足够了,这是因为最大相对变化主要发生在一个方向,例如从硅锭或硅块的底部至顶部。

[0080] 又或者,根据期望的理论关系式(如 Scheil 方程式),对所测掺杂浓度的变化量进行拟合,然后,根据该方程式计算出整个样品在各像素上的掺杂变化。作为拟合基础的实验数据,可以是二维分布,或一次或多次线扫描,或甚至仅仅是表面的一个或多个单个测量点值。从而对掺杂浓度数据中噪声分析的影响可以被避免,其中,所述噪声在实验数据中不可避免的。另外,一些测量技术如涡电流技术,会在样品的边缘附近测得的电阻率中生成伪量值。在这些情况下,实验数据要求对这些伪量值进行修正,或对来自于未受伪量值影响的区域的数据进行归纳。因此,无论如何都需要进行拟合和归纳。

[0081] 再或者,无需对掺杂进行测量,通过理论关系式或统计/经验产品数据来确定掺杂浓度的变化。

[0082] 无论是通过实验方法还是理论方法确定的掺杂浓度,若要提高精确度,可以根据掺杂浓度、测量时间、像素合并设置以及入射光强变化(实验测得或模拟得到)和集光效率将测得的 PL 数据转换为 PL_{norm} 。得到的归一化的 PL 数据可以表征图像区域中有效少数载流子寿命的相对变化。

[0083] 步骤(iii),可以基于经验的预定关系式 $PL_{norm} = f_{empirical}(\tau_{bulk})$,将归一化的 PL 强度 PL_{norm} 转换为体寿命 τ_{bulk} ,可以根据由其他设备得到的同一样品的体寿命数据对实验得到的归一化 PL 数据进行校正而得到该关系式。用于测量有效寿命的技术手段(如 QSSPC),通过体寿命和有效寿命之间已知关系式,可以用于得到体寿命数据。这些其他测量技术可用在经表面钝化后的已校正的样品上,以此获得更加可靠的结果。或者,利用钝化样品的已校正的 PL 图像,作为参考体寿命数据,从而确定经验关系式。之前讨论过的注入水平是体寿命的重要影响因素,因此相比其他技术手段而言,对 PL 数据校正的执行需要伴随两次具有相同或相似注入水平的测量。

[0084] 除了体寿命和掺杂浓度,影响检测到的非钝化硅块 PL 强度的主要变量为样品的表面特性,具体为表面的结构、反射系数以及由于切割造成的表面损伤的深度和刚度。实际上,相同的经验关系式 $PL_{norm} = f_{empirical}(\tau_{bulk})$ 被用于一条生产线中处于同一阶段的硅块/硅锭,这是因为其表面特性被认为足够相似。然而,对于不同生产阶段(如抛光的硅块相对于切割未抛光的硅块)的硅锭/硅块,应单独确定其经验关系式。在制造中,应定期核对和更新用于具体生产过程阶段的样品的校正关系式 $PL_{norm} = f_{empirical}(\tau_{bulk})$ 。

[0085] 还可以基于预定理论关系式 $PL_{norm} = f_{theoretical}(\tau_{bulk})$ 将归一化的 PL 强度转换为体寿命。该关系式的计算是基于在给定光照条件下,对样品内深度-依赖少数载流子浓度 $\Delta n(y)$ 进行的分析或数值计算,其中 y 为离表面的距离。图 5(a) 和图 5(b) 为厚度为 15cm 的硅块,在两束不同吸收系数的激发光(即不同激发波长)照射下,载流子的分布图。在各分布图中,表示有与 3 个体少数载流子寿命值的深度依赖载流子浓度,其中: $\tau_{bulk} = 10 \mu s$ (标绘 18); $\tau_{bulk} = 100 \mu s$ (标绘 20), 和 $\tau_{bulk} = 1000 \mu s$ (标绘 22)。所述计算可以采用过剩载流子浓度的分析模型或数值建模包如 DESSIS 或 PC1D 来被执行。鉴于样品中的重复吸收、探测器的灵敏度以及滤波器的透射率,被检测到的 PL 比率可以通过对自激辐射率在样品厚度上的积分,以及在辐射范围内积分来计算得到。对此, T. Trupke 撰写的“光子重复吸收对准稳态光致发光测量法测量晶体硅的影响”一文中已有相应的阐述,应用物理期刊 100,063531 (2006)。对不同体寿命值的范围的计算可以采用理论关系式 $PL_{norm} = f_{theoretical}(\tau_{bulk})$ 。

[0086] 上述计算原则上提供了一种归一化 PL 计数速率(表征为有效寿命)和体寿命之间的数值关系。然而实际应用中,这些计算通常仅提供相对关系式 $PL_{norm} = C * f_{theoretical}(\tau_{bulk})$, 这是因为关于不同硬件参数和样品特性的假设具有不确定性。比例因子 C 为常数,或对于同一生产阶段的不同样品来说比例因子非常类似,但是对于不同加工阶段的硅块来说,该比例因子必须分别确定。因此,尽管实际应用中,需根据定时间隔重复校正,监测和补偿硬件部件的偏离,但原则上对于同一加工阶段生产的硅块的测量来说(例如抛光后),仅需要就特定的硬件来对测量系统进行校正。对 C 的确定采用类似于以上的方式来进行,具体为与通过其他技术得到的实际体寿命数据进行比较。或者, C 还可以通过与其它已被校准的 PL 成像系统相比较来确定。单一数据点就足以完成该校正,但是为了获得更为可靠的结果,则可以对由一个或多个样品得到的两个或多个数据点取平均值。例如,校正常数可以通过硅块的一个或多个面的体寿命的断面图或直方图来确定。

[0087] 下面介绍的独立测量技术,通过将不同条件下采集的图像结合在一起,可用于对系统进行校正。

[0088] 如图 6 所示,为归一化的 PL 计数速率(表征为有效寿命)和根据上述计算得到的体寿命之间的理论关系,其中,圆点代表厚度为 15cm 的非钝化硅块,方点代表厚度为 $200 \mu m$ 的非钝化硅晶片。这些关系为显著非线性,两条曲线的检测值相对更薄的样品如非钝化晶片突出了体样品 PL 测量的意料不到的优点,所述体样品如硅块或硅锭。归一化的 PL 计数速率在体寿命值 τ_{bulk} 大于 $10 \mu s$ 就达到了饱和状态,然而对于硅块来说,当体寿命处于一个更高值的时候,它依继续发生显著变化,尽管体寿命达到 10 毫秒,它依然未达到饱和状态。晶片中观测到的饱和是由于当体寿命值大于 $10 \mu s$ 时扩散长度大于厚度所导致的,在这种情况下,提高体寿命或体扩散长度不会导致样品中全部载流子的浓度的增大。该

现象通常认为是有效载流子寿命受到了表面的限制。反之,对于更大厚度的硅块,扩散长度相比于厚度仍然为很小,因此硅块内的载流子浓度随着扩散长度增加而持续增大,且不受表面的限制。由此得到一个重要的结论,原则上从非钝化表面上获得的 PL 信号可以可靠地被转换为体寿命或体扩散长度数据,该体寿命值的范围要远大于非钝化晶片可能得到的体寿命值。

[0089] 作为体寿命函数,对归一化的 PL 强度的计算(例如图 6 所示)表明曲线的实际形状取决于用于测量 PL 的设备的的光谱灵敏度,其通常由相机光谱灵敏度和设置在相机前的滤波器的透射来决定。对长波长的光谱灵敏度的提高导致归一化的 PL 信号对体寿命的更强(更陡的)依赖,从而使得从 PL 强度到体寿命的转换更加精确。该效应可以从图 7 的图表上看出来,所述图表就两种不同的检测波长间隔 950-1000nm(方点)以及 >1050nm(圆点)对从 15cm 厚的硅样品的被选区域发出的 PL 信号所产生的预期变化进行比较。波长越长,PL 信号的灵敏度越高,是因为更长的检测波可以检测到样品内(如硅块)更深区域的载流子浓度,在该区域内,大部分过剩载流子的变化是由于长体寿命而产生的(相比于图 5(b))。实际上,这种长波长灵敏度的提高可以通过将截止波长为 1000-1200nm 范围的长波长滤波器引入到探测系统中来提高相对长波长灵敏度的方式来实现,或者可通过使用在更长波长时具有更高灵敏度的探测器来提高绝对长波长灵敏度的方式来实现,所述探测器为铟镓砷(InGaAs)相机。

[0090] 现在将结合图 8(a)至图 8(e),举例解释如何将原始 PL 图像转换为体寿命图像。图 8(a)为 p 型硅块的侧面获取的 PL 图像 24,图 8(b)表示了该侧面的 p 型杂质(硼)的具有代表性的分布 26,其中,灰度表示杂质浓度。PL 图像中强度的变化取决于杂质浓度与有效载流子寿命的乘积,将图 8(a)所示的 PL 图像根据图 8(b)所示的杂质分布被归一化处理,从而得到归一化的 PL 图像 30(如图 8(c)所示)。图 8(c)中强度变化表现了有效少数载流子的变化。为了将有效寿命转换为体寿命,可以利用如图 8(d)所示的有效载流子与体寿命之间的有代表性的非线性关系,将归一化后的 PL 图像 30 修正为图 8(e)所示的体寿命图 32,表明了样品硅块侧面的体寿命的变化。需要注意的是,图 8(d)所示的特殊非线性关系为简化的三次方程式,用于表示这种类型的实际经验关系或理论关系,所述的类型如图 6 中实心圆点所示。

[0091] 2) 硅块/硅锭 PL 图像中相对强度变化的解释

[0092] 在一些具体应用中,如将绝对计数速率作为第二考虑因素,以及根据具体图形或相对变化分析 PL 图像时,无需进行上述实施例中的步骤 ii),即根据本底掺杂浓度或测量参数的变化对 PL 计数速率进行归一化。两个例子为高位错密度的识别(例如图 3 中所示),和低寿命区域的识别,所述低寿命区域位于硅块或硅锭顶部、底部和侧壁(例如图 2 图 3 所示)。利用图像处理算法,将图像中不同的特征区别开来。

[0093] 硅块侧面的 PL 图像中观察到的位错密度可用于估计由该硅块切割下来的晶片的位错密度,以及估计硅块内体位错密度并作为硅块内高度的函数。这些信息可用于将晶片分拣入质量箱。结合从硅块的二至四个侧面的 PL 图像中提取的信息可以使上述估计更为精确。

[0094] 类似的,利用硅块一个侧面的 PL 图像可以识别顶部、底部以及在一些情况下侧壁的少数低寿命区域的位置和范围。结合从硅块的二至四个侧面的 PL 图像中提取的信息可

以使该分析结果更为精确。硅块的 PL 图像还可用于预测从硅块切割下来的晶片中的寿命分布；图 3 所示图像左手侧的低寿命区域 10（深色区域）可导致从硅块该部位切割下来的晶片边缘附近的低寿命区域。硅锭侧面的 PL 图像还可用于将硅锭切割成硅块的切割导引。

[0095] 3) 对不同测量条件下得到的图像进行合并

[0096] (a) 不同探测波长

[0097] 在上述公开号为 WO 2008/014537 A1 的 PCT 申请中，介绍了通过在相机镜头前安装不同光谱滤波器，获取至少两张发光图像的技术。由于在重复吸收之前，长波长的光照射在样品中具有更高的平均光程长度，因此通过在探测系统前设置不同滤波器的测量方法，可以捕捉样品中不同深度辐射出的光。两台不同滤波器下测得的光照强度比可以转换为体扩散长度。相比于太阳电池成品的电致发光 (EL) 图像，上述方法的优点在于在电池的 EL 成像中通常存在二极管电压的局部变化，而在光照强度比中，消除了该变化，因此两张未校正的图像的强度比可以提供绝对单位的扩散长度。

[0098] 该方法的基础在于，样品厚度上的相对载流子浓度分布根据扩散长度而变化，但是一旦扩散长度大于样品厚度的多倍时，该方法对于扩散长度的变化并不敏感。相同论述还可以用于解释应用在厚度大于 10cm 的硅块的类似技术内容，但是，现在的情况是，在更大的范围值上，扩散长度都比样品的厚度小，具体言之，该范围值可以是对于硅块所有被感兴趣的有实际价值的值。因此，造成体寿命或体扩散长度的变化对光照强度比产生影响的硅块中的体寿命或体扩散长度范围要远大于晶片或电池中相应的范围。

[0099] 应用上述方法，计算相同激发但不同探测下的图像的强度比具有两个优点：第一，可以从 PL 强度比可以估算出硅块的本底掺杂变化；第二，两张均为相对单位（每次测量以相同的入射光强照射并且每次测量均根据成像设备曝光时间和面元进行归一化处理）的未校正的 PL 图像比率，其中每张图像均为无需另外校正即可提供绝对体寿命或体扩散长度。

[0100] 按下列步骤实施本方法：

[0101] 步骤 (i)：使用相同或相近光强度但两个不同探测波段测量两张 PL 图像。其中一次测量优选使用短波光子，以得到前表面附近载流子浓度的增强信息，而第二次测量使用长波光子，从而测得样品中达到某一具体深度的平均载流子浓度。

[0102] 步骤 (ii)：或者，对每张图像进行关于相机曝光时间以及面元的归一化，必要时，还可以对每张图像进行关于光照强度和 / 或集光效率的实验测得的变化或模型化变化的归一化。

[0103] 步骤 (iii)：对于每个像素，对两张归一化的图像进行强度比的计算。

[0104] 步骤 (iv)：根据预定关系式，将计算得到的各像素上的强度比转换为体寿命。

[0105] 或者，根据光照强度的变化和 / 或集光效率进行多张图像的合并归一化可以被用于计算强度比。步骤 (iv) 所述的预定关系式是将实验得到的 PL 强度比与实验体寿命或体扩散长度数据进行比较后，根据经验确定的，或在不同体寿命 / 体扩散长度的范围内，利用常用建模程序（如 DESSIS, PC1D）分析或数值计算得到相对载流子分布，然后考虑重复吸收和传感器灵敏度因素，利用载流子分布计算两张预期测量得到 PL 强度，从而得到体寿命 / 扩散长度值。对两张 PL 图像分别进行上述计算通过计算预期强度比，得到体寿命 / 扩散长度值，并将强度比作为体寿命 / 扩散长度的函数，生成分析曲线或查询列表。

[0106] 厚度为 15cm 的硅样品,作为体寿命函数探测到的 PL 强度的计算数据如图 7 所示。参考左手侧的 Y 轴,在 950-1000nm 光谱范围内采集到的理论 PL 强度以实心方点绘制,而大于 1050nm 光谱范围采集到的理论 PL 强度以实心圆点绘制。参考右手侧的 Y 轴,图 7 还显示了作为体寿命函数的两次 PL 信号的比(空心三角),可以看出通过强度比的变化可以直接对体寿命进行修正,两张滤波合成图像在低寿命时屈服于相同的 PL 计数速率,得到统一的强度比结果,这一巧合是选择了特定的波长间隔以及在具体实验条件模型所导致的。

[0107] 如果镓砷相机、红外敏感的光电倍增硅相机或类似的在 1100-1300nm 范围内具有明显光谱敏感的传感器和适当的较长波长滤波器联合起来被使用,则可以探测硅块内更深位置的载流子浓度变化,从而探测更长扩散长度的扩散长度变化。

[0108] 图 7 所示的强度比曲线表明,在体寿命值较高时,强度比的变化最为显著,因此,本方法可被特别用于测量多晶硅块或硅锭的侧面或高寿命多晶硅块的表面。

[0109] 介质滤波器由于具有陡峭的起始和截止波长,即从高透射到低透射的过渡,原则上可以对不同 PL 波段进行很好的筛选。然而介质滤波器的透射有很强的角相关特性,随着入射角的增大,起始/截止波向短波方向移动。本申请中需考虑该影响,如图 11 所示,来自扩展样品 42 的 PL 辐射 40,在一定的入射角范围内冲击设置于相机 46 之前的介质滤波器 44,其中,所述样品可以是硅晶片或硅块。很明显,这将影响单张 PL 图像中的 PL 强度分布,并由此进一步影响强度比和分析结果。若使用介质长通(LP)滤波器获取长波 PL 图像,和使用短通(SP)滤波器获取短波 PL 图像时,该影响会更为明显,这是由于起始/截止波的角相关性对长通或短通滤波器后采集到的图像具有反向效应。随着入射角的增大,起始/截止波向短波方向移动的意义为,通过短通(SP)滤波器后采集到的 PL 图像在离轴位置强度相对减小,而由长通(LP)滤波器采集到的 PL 图像在离轴位置的强度相对增大。

[0110] 有很多技术手段可以用于缓解上述问题,这些技术手段可以单独地或结合起来被应用。如图 11 所示,表示了增加相机 46(以及滤波器 44)与样品 42 之间的距离,可以减小入射角的范围,但这样就约束了系统设计,并且由于样品表面 PL 辐射的类朗伯体模型,必然使得被吸收信号强度的减小。

[0111] 另一方法为利用关于各滤波器的测量得到的平场校正数据,同时考虑了透射的角相关性的,对长波图像或短波图像进行适当的校正。例如,对给定的滤波器进行平场校正,可以通过滤波器来采集高质量多晶硅晶片的 PL 图像,所述硅晶片可以认为在其整体区域内具有统一的 PL 响应。由此导出的平场校正还可校正系统中其他的非均匀性情况,尤其是集光效率的角相关性。由于几台介质滤波器在其区域内不是各向同性的,因此还必需针对某一具体滤波器定位做平场校正的测量,并且接下来在采集图像的过程中需要维持这种定位。当利用不同滤波器计算两张图像的强度比时,既可以在计算强度比之前对各图像进行校正,也可以采用联合平场校正对强度比图像进行校正。

[0112] 为了阐述该校正过程,图 12(a)和图 12(b)分别表示了通过 1000nm 短通滤波器和 1050nm 长通滤波器采用硅 CCD 阵列采集到的硅太阳能电池的 PL 图像。图 13(a)为图 12(a)图像沿横截面对角线的 PL 强度分布,而图 13(b)为图 12(b)为相应的 PL 图像强度分布。从强度分布图中可以看出,高强度区域 48 和低强度区域 50 叠加在由金属手指导致的梳状信号 52 上,以及由于母线导致的低强度尖峰 54 上。图 12(a)(短通)图像的强度在角落处显著降低,其中一部分是由于上述滤波器的角相关性所造成的。我们注意到图 12(b)(长通)

图像的强度在角落出也降低了,尽管降低的趋势要小于短通图像;这是因为使得角落的强度增大的滤波器角相关性的影响没有其它的影响大,这些其它的影响可以是集光的角相关性影响。图 12(c) 所示的图像为图 12(a) 和图 12(b) 所示图像的强度比,而图 13(c) 为沿横截面对角线的 PL 强度分布,同样在角落呈现滚降。最后,图 12(d) 和图 13(d) 为平场校正后的强度比图像及其相应的 PL 强度分布,可以明显看出角相关性的假象被消除了。

[0113] 或者,吸收滤波器可被用于对不同 PL 波段进行选择。与介质滤波器不同,其透射与入射角几乎无关,但是其吸收边缘较平缓,从而导致波段选择 / 滤除的质量较低。

[0114] 我们注意到图 12(b) 的图像,其具有较长波长的 PL 辐射,与图 12(a) 的图像相比更为灰暗。这是因为硅对波长较长的光的吸收率低,导致了硅 CCD 相机像素中的横向拖尾效应。正如在公开为 W0 09/121133 的 PCT 申请中所讨论的一样,在上述情况下,图像对比度可以通过光探测系统的理论或实验测量点的扩展函数得以增强。

[0115] 强度比测量法的实际应用如图 14(a) 和 14(b) 所示。采用强度为 1Sun 的由二极管激光阵列发出的近红外光对 P 型多晶硅块的一侧进行照射,然后采用硅 CCD 相机首先通过 1050nm 的长通滤波器被成像,然后通过 1000nm 的短通滤波器对 PL 辐射进行成像。对图像的强度比进行逐一像素的计算,最终得到的比率图如图 14(a) 所示,其中比率范围从在低寿命区域的 1 到在高寿命区域的 3。然后,通过理论关系式将各像素上的强度比转换为体寿命,转换后的体寿命图像如图 14(b) 所示。需要注意的是,由于硅块的尺寸,需要通过每台滤波器采集的两张图像并将其缝合在一起;图 14(a) 和图 14(b) 上的接头采用箭头来表示。

[0116] 使用光滤波器筛对 PL 图像的波长范围进行选择,可以降低相机采集到的 PL 信号强度,潜在地导致了图像采集时间的增加和测量速度的下降。或者,通过使用像素拼合和两张按先前描述的用于获取体寿命的低空间分辨率图像的方式处理得到的图像来采集具有低空间分辨率的短波长和长波长 PL 图像,但并未将信号归到噪声比。然后,对没有进行像素拼合的高分辨率 PL 图像进行采集,然而这并未采用光滤波器和用于获取体寿命高分辨率图像的相关数据。本实施方式需要对第三张 PL 图像进行采集,但是由于滤波后的图像可以被更快地采集到,因此本实施方式的过程进行的更快。从强度比图像中获得的体寿命数据与未滤波 PL 图像的对比可以用于获取样品中本底掺杂变化的信息。

[0117] (b) 不同激发波长

[0118] 以类似的方式,可以采用相同的探测波段但是不同激发波长,从硅块或硅锭的 PL 图像比中获取绝对体寿命 / 扩散长度分布,其中,所述激发波长在样品内不同深度处产生过剩载流子。如图 9 所示为两张 PL 图像的作为体寿命函数的光照强度比,其中所述 PL 图像为在 800nm 激发和 600nm 激发下从厚度为 15cm 的硅块分别获取的。

[0119] 图 9 中的强度比曲线表明本方法仅可以得到短扩散长度 / 低寿命下的绝对体寿命或扩散长度信息,这是因为当体寿命值大于 $10 \mu s$ 时,不同激发得到的 PL 强度比对体寿命变化极不敏感。对于长扩散长度,激发波长对相对载流子浓度无显著影响,因此 PL 强度比为常数。然而,本方法同样具有关于探测波长范围变化测量的一些相同的优点,其中,可以根据 PL 强度比和两张未被校正的 PL 图像对样品的本底掺杂变化进行估算,每张图像均在相对单位下(每张图片采用相同入射光强度进行测量且根据成像相机曝光时间和面元进行归一化)提供了绝对体寿命或体扩散长度无需进行外部校正。

[0120] (c) 不同探测和激发波长

[0121] 用样可以通过获取两张 PL 图像的强度比来确定样品体特征参数,其中,在所述 PL 图像中激发和探测波长在两张图像间被改变。或者,也可以将两种方法结合在一起,从而在高体寿命区域内对采用不同探测波长获取的两张图像强度比进行分析,而在低寿命区域内对采用不同激发波长获取的图像比进行分析。

[0122] 4) 获取本底掺杂变化信息

[0123] 以下应用尤其适用于硅块和硅锭,但原则上也可用于掺杂浓度横向变化的晶片。由于测得的 PL 信号与有效寿命和本底掺杂浓度均成正比,因此可以通过对被测的 PL 强度进行关于在单独寿命测量中测得的寿命变化的归一化来获取本底掺杂强度的信息。具体言之,第 3 节中描述的方法可以用于获取体寿命信息,无需校正。

[0124] 根据任何体寿命变化数据和如图 6 所示的归一化 PL 计数速率与体寿命之间的关系,可以计算出期望的归一化的 PL 强度变化。根据测量到的 PL 图像和基于体寿命的期望 PL 强度之间的比可以得到样品掺杂浓度的相对变化。尤其可以采用通过第 3 节中所描述的方法获取的体寿命数据对本方法进行应用。在这种情况下,PL 图像可以是两张采用不同探测波长或不同光照波长获得的独立的 PL 图像中的任意一张,或为一第三张 PL 图像。或者,当采用单独的测量法测量有效寿命时,进行关于有效寿命变化的归一化得到的 PL 图像为一张具有相对掺杂浓度变化的图像。无论采用哪一种方法,如果在某一点上的掺杂浓度或样品的平均掺杂浓度是已知的,那么,样品的相对掺杂浓度变化可以被校正为绝对掺杂浓度图像。当该校正被应用于生产中具有相似表面特性的样品上时,该校正则不必要被应用到每个样品上。或者,相同的校正常量可被应用于具有相似的或实质相同的光学表面特性的不同样品上,所述样品可以是抛光后的硅块。

[0125] 在有效寿命可以被假定为恒定的情况下,测量得到的 PL 强度变化为相对掺杂浓度变化的图像,其中,如果在某一点上的掺杂浓度或样品的平均掺杂浓度是已知的,所述 PL 强度变化则可被校正为绝对掺杂浓度图像。例如,在上述假设成立的前提下,对于样品为具有高体寿命的非钝化的晶片来说;样品有效寿命(相比于图 6 中的方点)为恒定,且 PL 强度直接揭示了掺杂变化。这可以被用于测量多晶硅晶片中的杂质条纹。

[0126] 在其他特定情况下,掺杂浓度变化非常显著,从而有效寿命的微小变化仅能导致微小误差,而这些微小误差对于某些应用来说是无关紧要的。这种情况涉及到补偿后或 UMG 硅块,在其由 p 型向 n 型过渡的区域内,有效掺杂浓度的变化非常明显,表现在 PL 计数速率中的最小值。例如,图 4 中所示的 UMG 硅块的 PL 图像,顶部附近的深色带 16 表示了该过渡区域的精确位置,而无需就寿命变化对 PL 信号进行补偿。能够对过渡区域进行快速地且精确地定位,这为晶片生产商提供了切割导引,以识别并对晶片的 P 型区域、过渡区域和 N 型区域分类。接下来是在不考虑寿命中变化的情况下进行的分析。因此假设有效寿命的变化远小于有效掺杂浓度的变化。

[0127] 为了阐明将 PL 数据直接转换为掺杂浓度变化的过程,图 (10) 表示了(参考左手侧 Y 轴)图 4 所示的 PL 图像中 PL 强度从底部到顶部(从左往右)的线扫描 34,以及(参考右手侧 Y 轴)拟合后的理论有效掺杂浓度,即掺硼浓度和掺磷浓度的绝对差值(虚线 36),其中各浓度均参考 Scheil 方程式计算得到。当有效寿命未发生变化时,PL 强度有望与有效掺杂浓度成正比。

[0128] 在计算理论有效掺杂浓度时,晶体硅中硼与磷的分凝系数 k_{eff} 均为从文献中得到。唯一剩余拟合参数为原料中的初始掺硼浓度 $N_{\text{B}}(0)$ 和掺磷浓度 $N_{\text{P}}(0)$; 改变上述参数使得在相对单位 36 的有效掺杂和已测 PL 强度的线扫描 34 间实现最好的拟合。 $N_{\text{B}}(0)$ 和 $N_{\text{P}}(0)$ 的变化可以导致绝对有效掺杂的变化和有效掺杂的最小值在 X 轴上的移动,且,当最小值恰巧与 PL 强度 38 的最小值重合时,停止改变上述参数。

[0129] 如图 (10) 所示,将相对有效掺杂浓度拟合为的 PL 强度截面,实现了对 $N_{\text{B}}(0)/N_{\text{P}}(0)$ 比率的量化,该方法是基于以下假设的:原料仅包含一种主要施主类型和一种主要受体类型,并且施主原子和受体原子均根据 Scheil 方程式分布。在上述假设条件下,对于其他硅中的掺杂原子,如镓,该方法可以以相似的方式被执行。

[0130] 5) 注水水平对少数载流子寿命的影响

[0131] 在背景技术中曾提到过,准稳态条件下,有效少数载流子寿命与产生率 G 成反比,与少数载流子浓度成正比,即 $\tau_{\text{eff}} = \Delta n/G$ 。但实际上,少数载流子寿命还是注入水平的函数,这使得现有寿命测量技术变得复杂。S. Bowden 和 R. A. Sinton 于 2007 年在应用物理期刊 102, 124501 上发表了题为“利用载流子浓度的精确表达式确定硅块和硅晶片中的寿命”的论文,采用 QSSPC 技术,针对恒定光照强度(即 G 为常数)对寿命数据进行报告,使得各有效寿命对应的注入水平不同(和晶片的 PL 图像中的情况一样),或对于恒定注入水平来说,相当于报告不同光照强度照射下的寿命数据。上述两种方法均存在一定的缺陷,即在相同注入水平下或相同光照强度下(或两者的结合),所得到的具体寿命范围值,与太阳能电池的工作相关性较小或没有相关性。

[0132] 相反的,我们惊奇地发现,体硅样品(如硅块)的单张 PL 图像可以允许在恒定光照水平以及在恒定的定义良好的平均注入水平下对大范围的体寿命进行测量。为了理解该反常结果,则需考虑平均载流子浓度的定义和产生率。测量晶片寿命时,通常对 Δn 和 G 在样品厚度内对取平均值。然而, Bowden 和 Sinton 在其发表的论文中指出,该方法不适用于诸如硅块的体样品,这是因为相对于整体样品厚度,大量的过剩载流子仅分布在光照表面附近的很小体积内(与如图 5(a) 和图 5(b) 所示的载流子浓度分布图相比)。Bowden 和 Sinton 提出了用于解决该问题的分析方法,即定义载流子浓度的加权平均值 n_{avg} 和有效样品宽度 W_{eff} 。我们在此使用上述定义,并相应地使用平均过剩载流子浓度的标记。

[0133] 利用上述 Bowden 和 Sinton 的论文中所介绍的分析模型,分别针对两个吸收系数($\alpha = 700\text{cm}^{-1}$, 对应于 800nm 的入射光, $\alpha = 3.5\text{cm}^{-1}$, 对应于 1100nm 的入射光),过剩载流子浓度作为非钝化硅块内位置的函数可被计算得出,并被标绘在图 5(a) 和图 5(b) 中。表面(位置 = 0)的过剩载流子浓度为零,这是因为该表面为非钝化表面。图 5(a) 和图 5(b) 均表示了针对三个体寿命值,过剩载流子浓度与位置的对应关系,其中体寿命值分别为: $10\mu\text{s}$ (标绘 18), $100\mu\text{s}$ (标绘 20) 和 $1000\mu\text{s}$ (标绘 22)。各图中,矩形 40(图中仅针对 $\tau_{\text{bulk}} = 100\mu\text{s}$ 和 $\tau_{\text{bulk}} = 1000\mu\text{s}$ 的标绘)与坐标轴的交点为 Δn_{avg} 和 W_{eff} 的值。对比图 5(a) 中在短波长($\alpha = 700\text{cm}^{-1}$) 激发下的这些矩形,可以看出随着体寿命的增长,载流子分布的变化主要为有效宽度的变化,而平均载流子浓度近似为恒定。在长波长($\alpha = 700\text{cm}^{-1}$) 激发下进行相同的比较,可知平均载流子浓度(与平均注入水平相关)随着寿命的增大而显著增大。

[0134] 根据 Bowden 和 Sinton 提出的下列方程式,作进一步观察:

$$[0135] \quad \Delta n_{\text{avg}} = \frac{\alpha N_s L^2}{2D(\alpha L + 1)^2} \quad (1)$$

[0136] 其中, L 为扩散长度, D 为扩散系数, N_s 为进入样品的光通量, α 为吸收系数。当 $\alpha L \gg 1$ 时,即在短波长激发(或长寿命)的条件下,方程式(1)可简化为:

$$[0137] \quad \Delta n_{\text{avg}} = \frac{N_s}{2D\alpha} \quad (2)$$

[0138] 表明,平均注入水平不再取决于寿命。另一方面,对于 $\alpha L \ll 1$,即长波长激发时,代入关系式 $\tau = L^2/D$,方程式(1)可简化为:

$$[0139] \quad \Delta n_{\text{avg}} = \frac{\alpha N_s \tau}{2} \quad (3)$$

[0140] 表明,平均注入水平与寿命 τ 成正比。

[0141] 现在转而考虑注入水平对 PL 数据的影响,我们注意到,PL 图像通常是通过大约为 $\lambda = 800\text{nm}$ 的红外激发采集得到。在该区域内,吸收系数 $\alpha \sim 700\text{cm}^{-1}$,当 $L \geq 100\ \mu\text{m}$ 时,满足 $\alpha L \gg 1$,p 型硅中扩散长度等于 $\tau_{\text{bulk}} = 3.5\ \mu\text{s}$ 。重要的是,在最相关区域 $\tau_{\text{bulk}} > 3.5\ \mu\text{s}$ 内,用 $\lambda = 800\text{nm}$ 的激发光横向恒定照射,所得到的单张 PL 图像为在注入水平近似恒定时的寿命变化。当 $D = 27\text{cm}^2\text{s}^{-1}$, $N_s = 3 \times 10^{17}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 时,通过方程式(2)计算得到 $\Delta n_{\text{avg}} = 8 \times 10^{12}\text{cm}^{-3}$,与寿命无关。

[0142] 选择波长 $\lambda = 800\text{nm}$ 左右的近红外光进行激发的另一优点在于,对于常规体寿命来讲,其导致的硅块内的平均注入水平非常接近于处于最大功率点的常规工业硅太阳能电池成品中和注入水平。激发的变化或光照强度的变化(或改变两者),可使注入水平根据要求被进行微调。在该注入水平范围内测量寿命数据可便于分析,且可避免材料参数的注入水平依赖关系的不精确,所述参数如载流子迁移率或辐射复合系数,所述参数在高注入水平时变化很大。分析模型定义了硅块中空间平均注入水平,在该分析模型的基本限定中,PL 成像为体寿命的评估提供了理想的条件。

[0143] 平均注入水平与采用短波长激发硅块进行的 PL 测量中的体寿命相关性较小,这给出了另一个暗示,即注入水平与光照强度几乎为线性相关。在不同光照强度下,对同一硅块区域进行多次光致发光图像的获取,可以测得各点或图像中具体区域内的取决于注入水平的寿命。以上的测量可以通过针对光照强度对被测量的图片进行归一化,然后将强度归一化后的 PL 计数速率转换为体寿命,后者的转换方式已在先前被描述过。

[0144] 由于平均注入水平与产生率 G 成正比,而产生率 G 本身与入射光强度成正比,因此可以根据方程式(1)或方程式(2)将测得的入射光强度转换为平均注入水平。通过采用不同光强照射得到的多张 PL 图像,可以计算得出体寿命的注入水平依赖性,并绘制出具体区域或单个像素。

[0145] 就对比来说,我们考虑到注入水平对 QSSPC 数据的影响。例如,利用 QSSPC 工具,此工具为 Sinton 咨询公司的“boule 测试仪”,将体寿命报告为注入水平的函数。在恒定平均载流子浓度,通常为 $\Delta n_{\text{avg}} = 5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 下,体寿命估算值的线扫描被报告为处于一恒定平均载流子强度,通常为 $\Delta n_{\text{avg}} = 5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 。由于本系统使用的是宽带光源,因此不可能采用简单分析方式。假设照射光波长为 1100nm ($\alpha = 3.5\text{cm}^{-1}$),当体寿命 $\tau_{\text{bulk}} < 3\text{ms}$ 时,认为 $\alpha L < 1$,根据方程式(1)和方程式(3)计算得出,在该范围内,平均注入水平随着体寿

命的增长而增大,这一点与晶片寿命的测量类似。当光照强度为 1Sun ($N_s = 3 \times 10^{17} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, $\alpha = 3.5 \text{cm}^{-1}$), 且当 $\tau_{\text{bulk}} = 10 \mu\text{s}$ 和 $\tau_{\text{bulk}} = 100 \mu\text{s}$ 时, 根据方程式 (1) 分别计算得到的 $\Delta n_{\text{avg}} = 4.7 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 和的 $\Delta n_{\text{avg}} = 3.7 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。为了得到常规平均载流子浓度 $\Delta n_{\text{avg}} = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, 当 $\tau_{\text{bulk}} = 10 \mu\text{s}$ 时, 要求入射光强度应为 100Suns ($N_s = 3 \times 10^{19} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) 左右。当 $\Delta n_{\text{avg}} = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, 为了达到更短的寿命则需要更强的光强度。需要注意的是, 上述强度因素在很大程度上取决于光强分布图中确切的光谱含量, 但附图表明, 在进行典型的 QSSPC 测量时, 为了达到 $\Delta n_{\text{avg}} = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, 通常要求较大光强度。对于传统太阳能电池的应用来说, 这些光强度是不现实的, 这是因为太阳能电池通常工作在等同于 1Sun 的光照强度下且在某一工作点处, 在该工作点处晶片内部载流子浓度被降低到在开放环路的条件下, 且在 0.05Sun 光照强度下可被获得一个值。因此在数十或数百个 Sun 下获得寿命数据不太适用于太阳能电池的应用。

[0146] 本文阐述了很多具体实施细节。但是, 本发明的实施方式并不仅仅局限于这些具体细节。对于本发明未详细阐述的其他实施方式、已知方法、结构和技术亦不会影响对本说明书的理解。

[0147] 尽管通过参考某些优选实施方式对本发明进行了阐述, 但由此所引伸出的变化和变动仍处于本发明创造的保护范围之内。

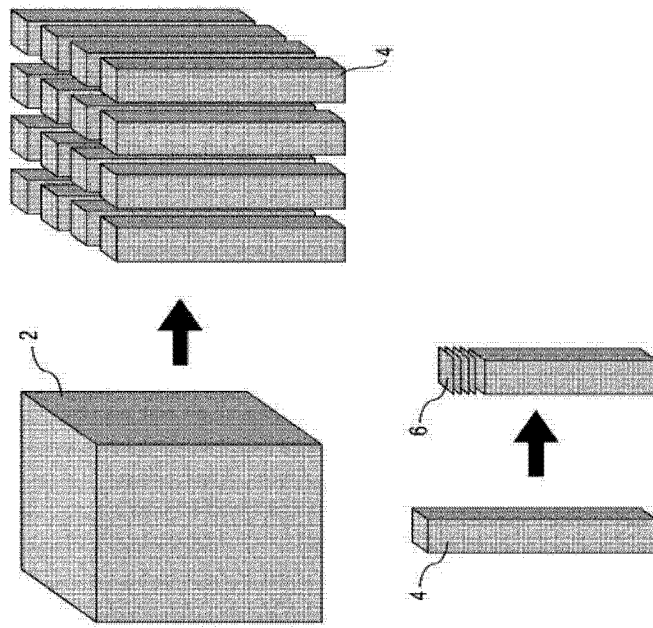


图 1

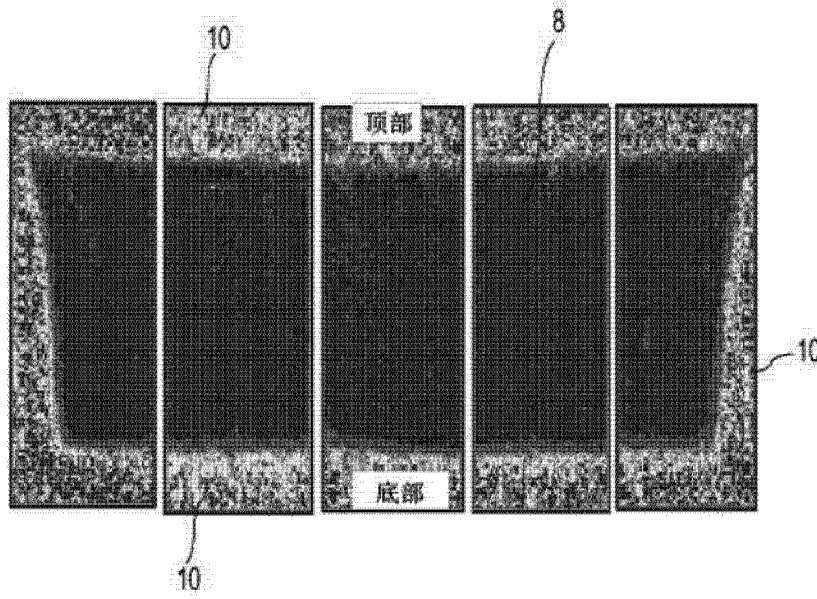


图 2

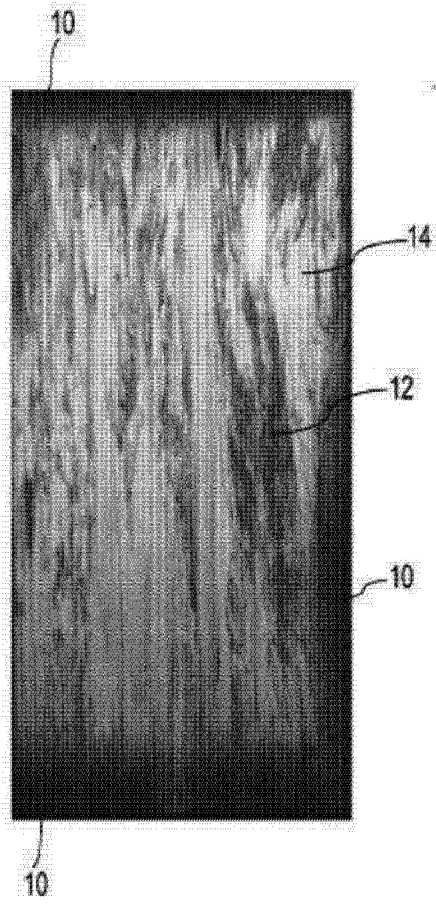


图 3

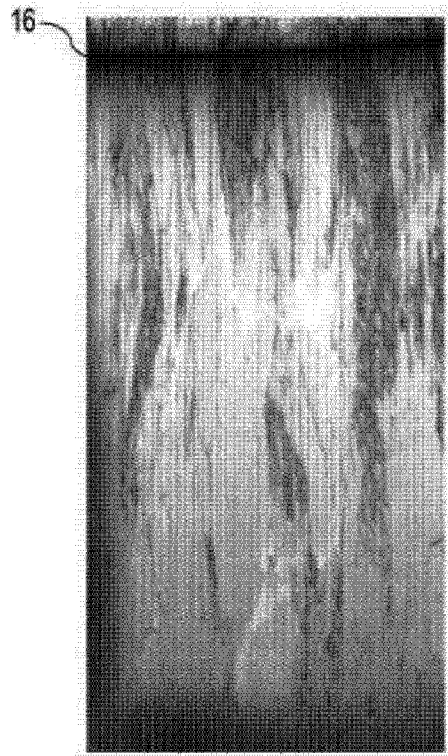


图 4

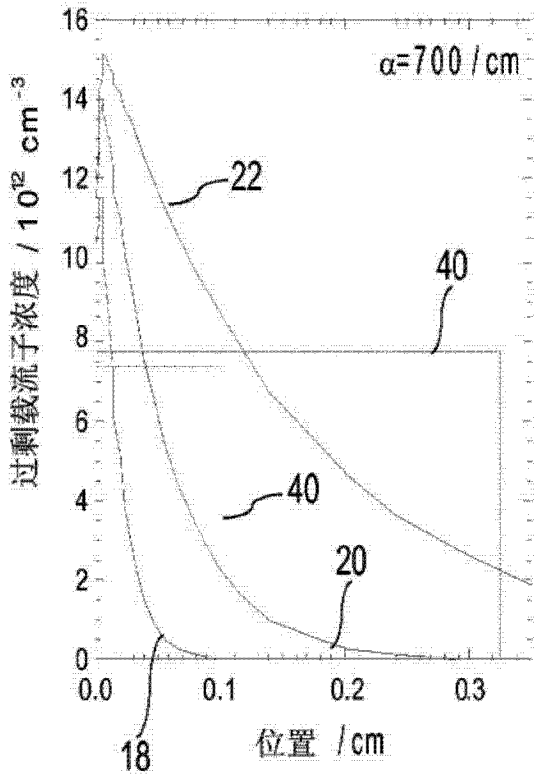


图 5(a)

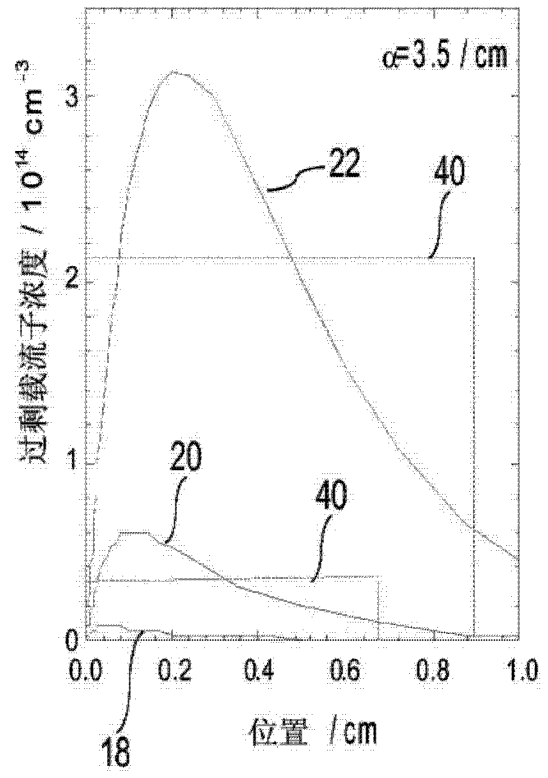


图 5(b)

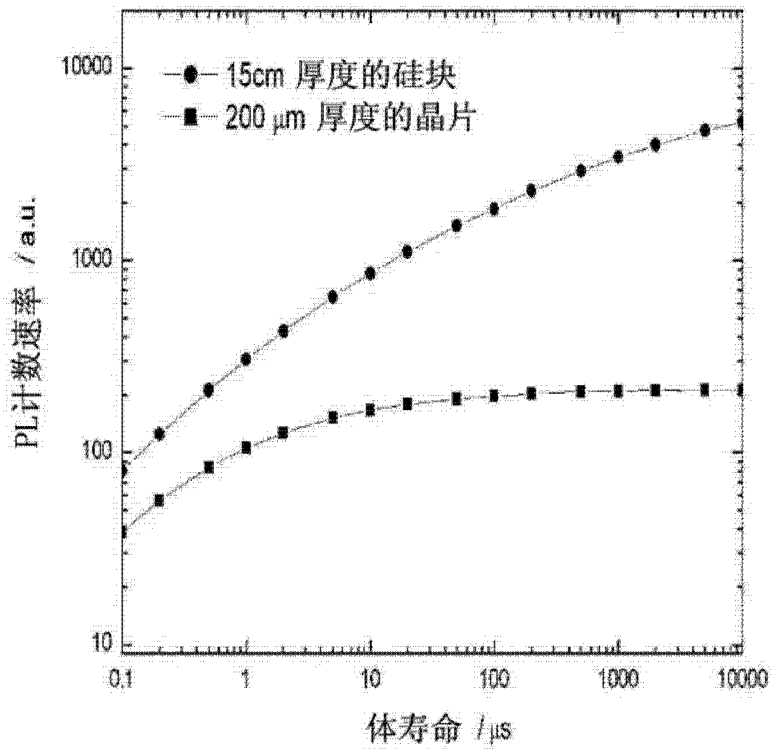


图 6

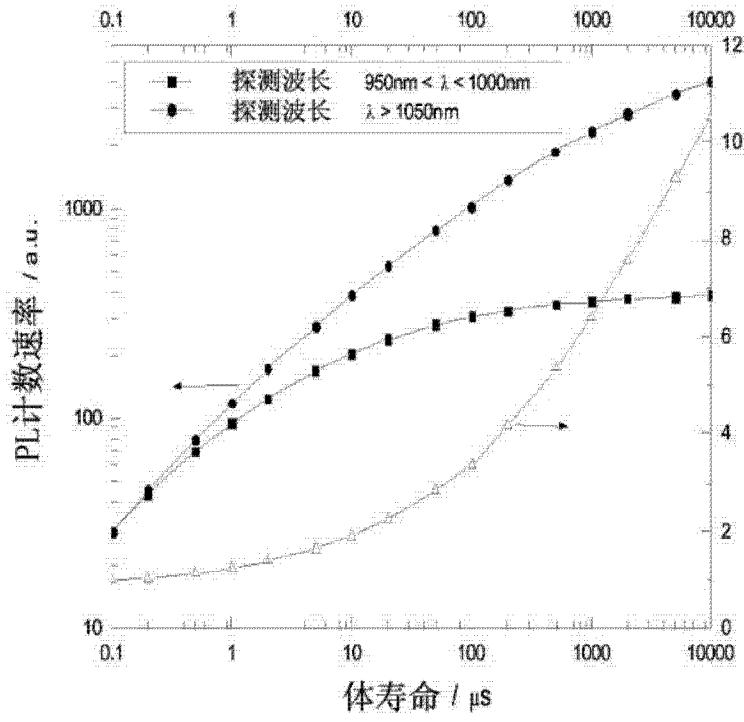


图 7

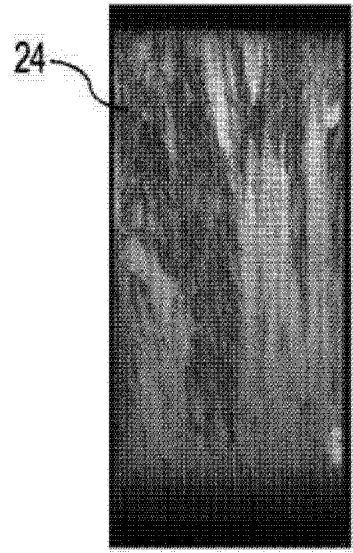


图 8(a)

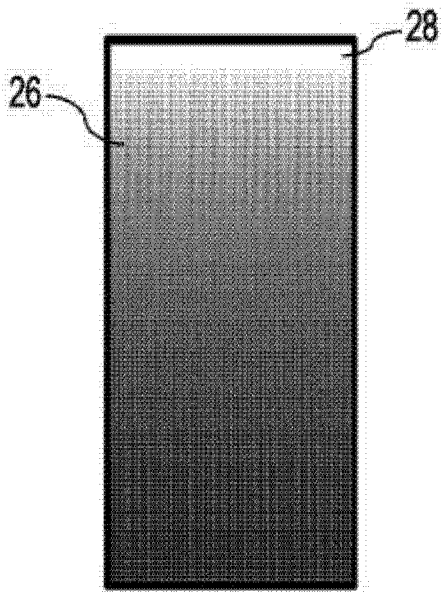


图 8(b)

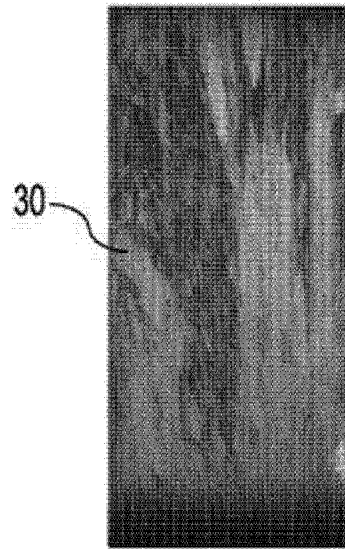


图 8(c)

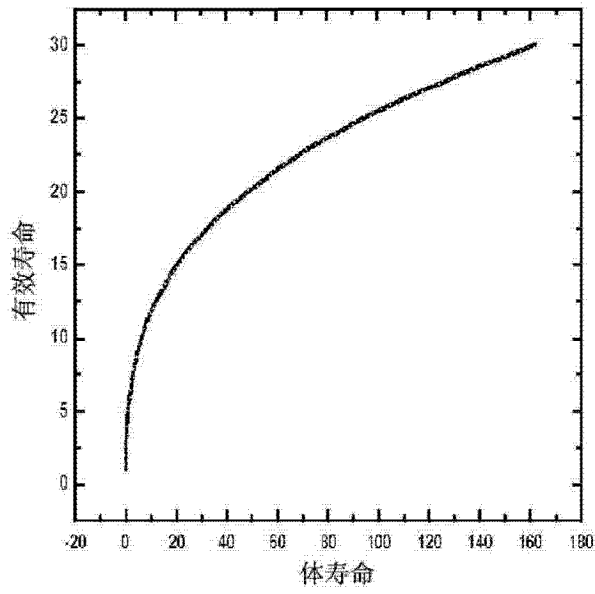


图 8(d)

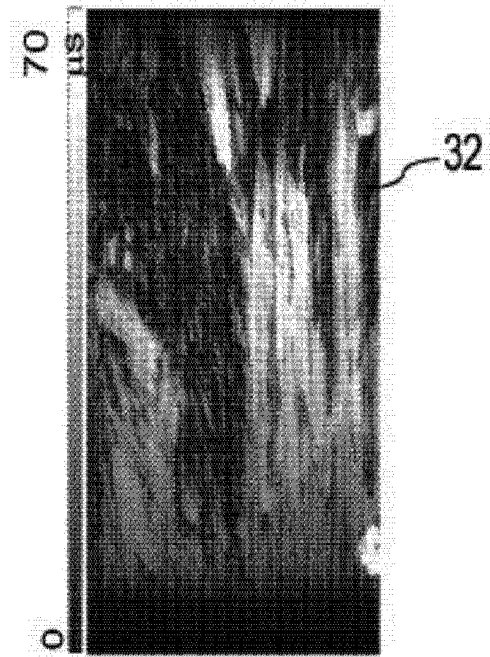


图 8(e)

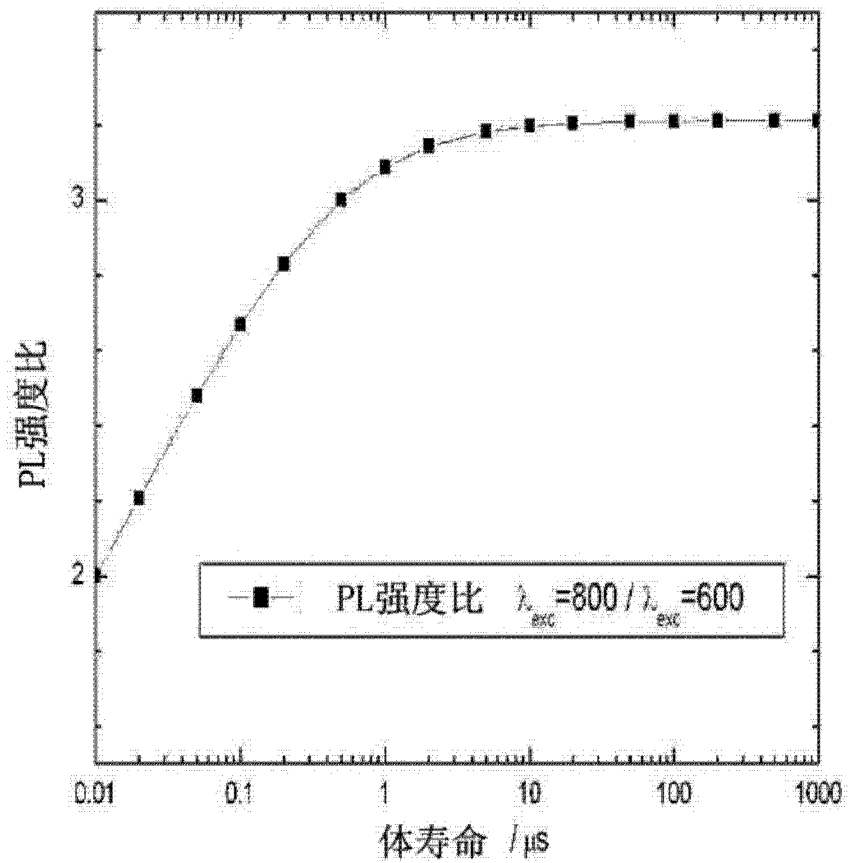


图 9

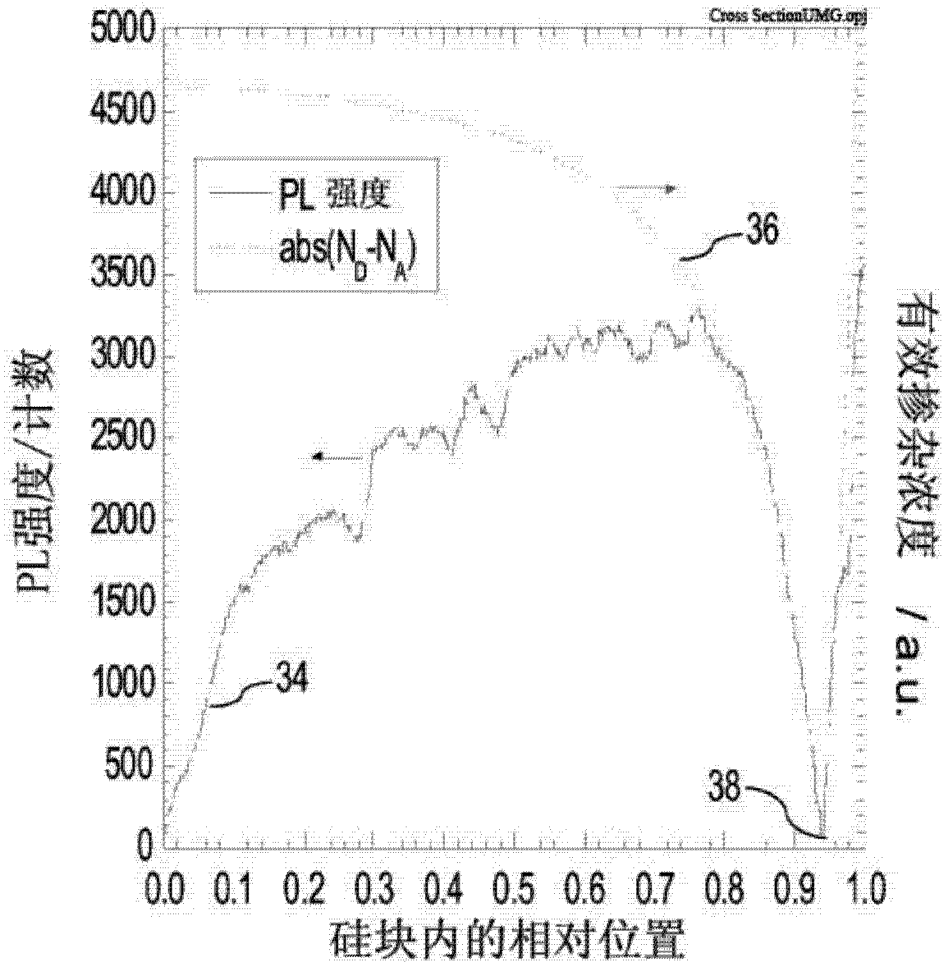


图 10

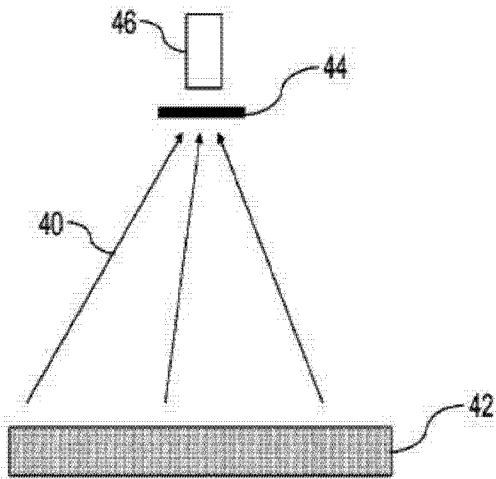


图 11

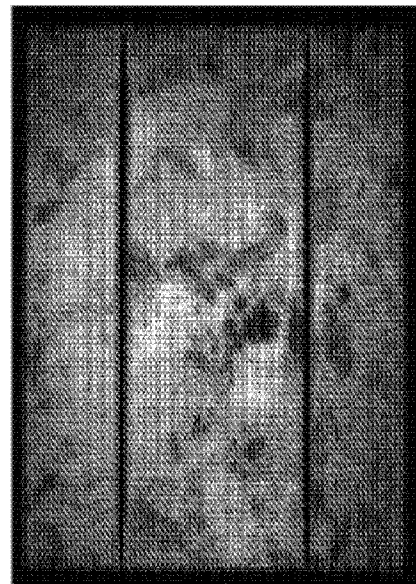


图 12(a)

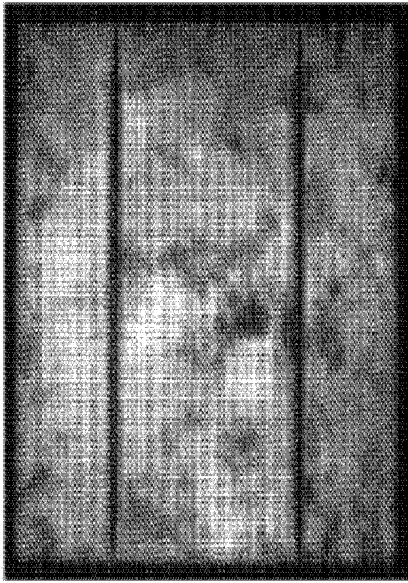


图 12(b)

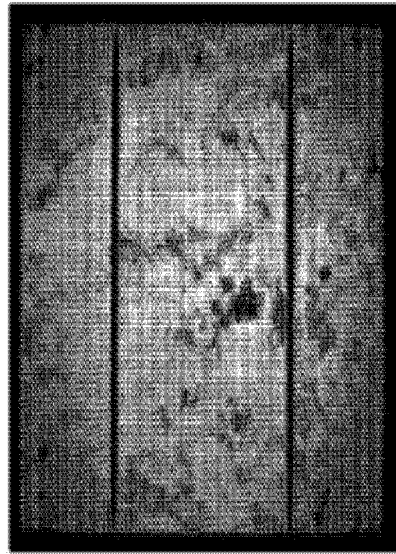


图 12(c)

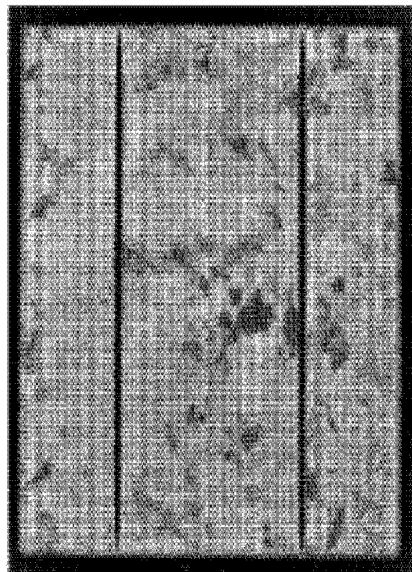


图 12(d)

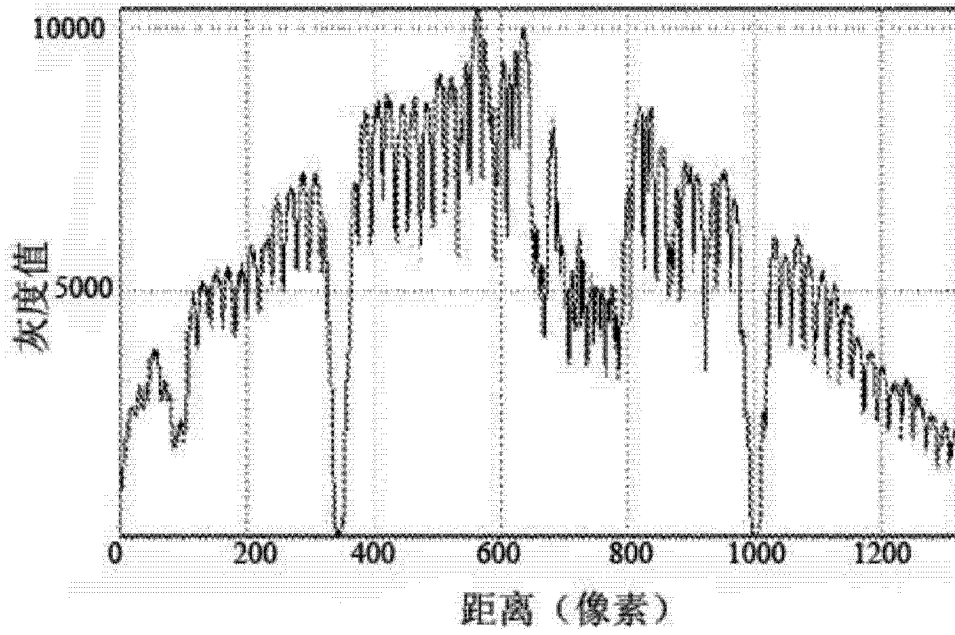


图 13(a)

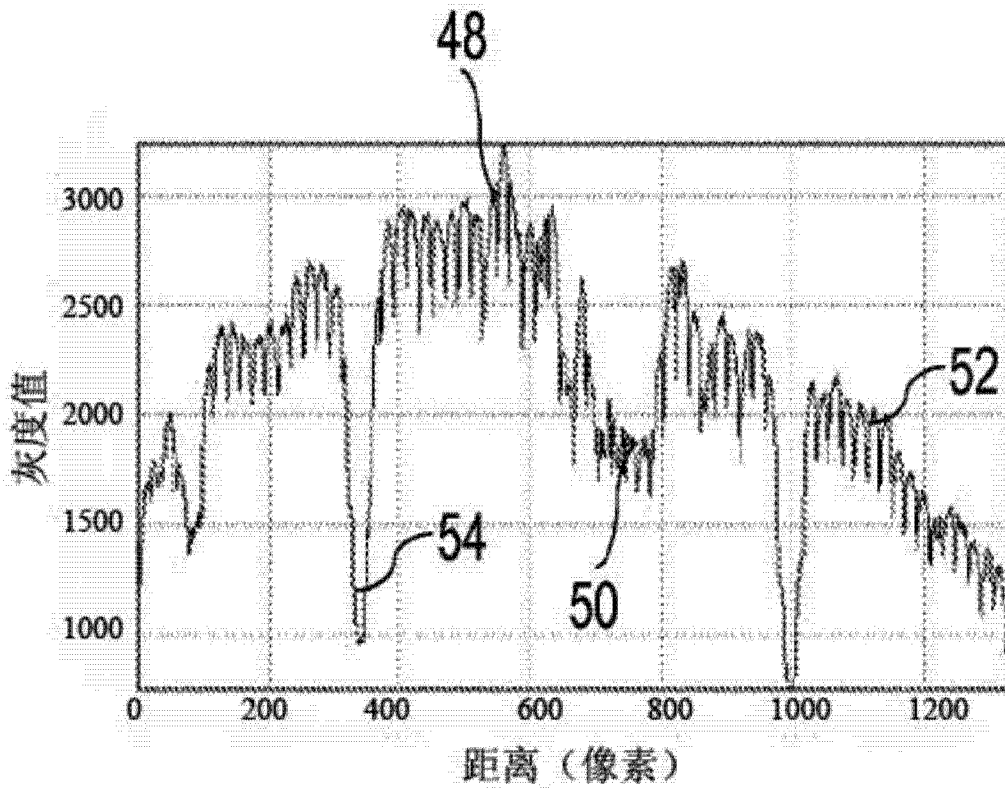


图 13(b)

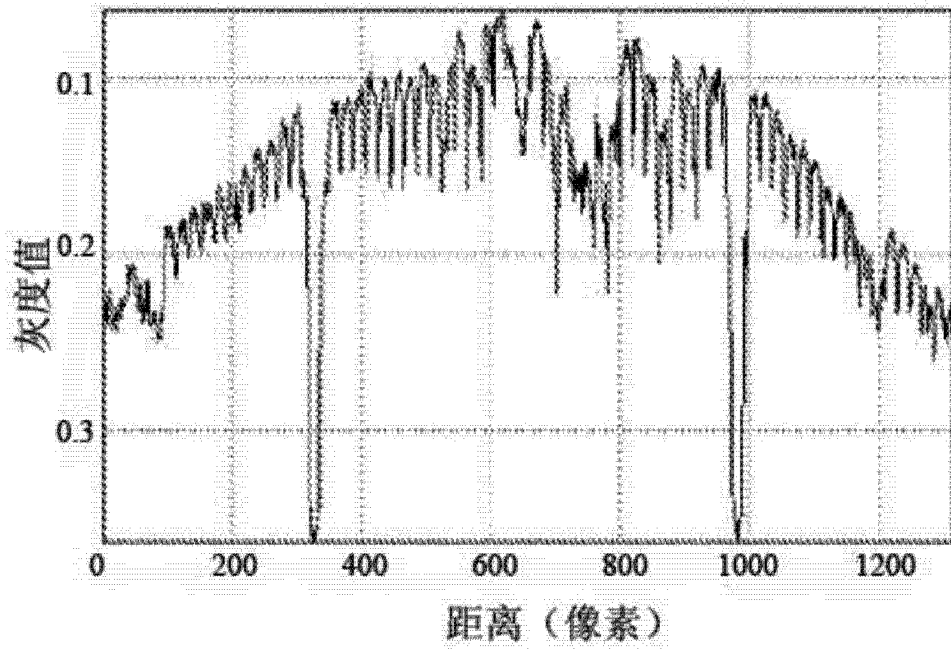


图 13(c)

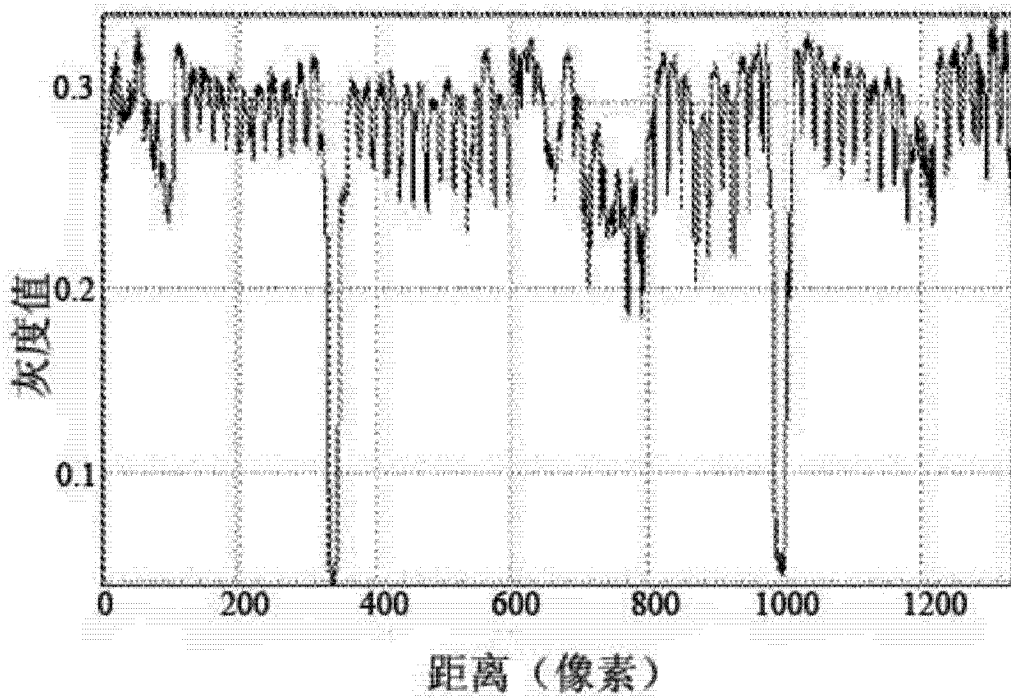


图 13(d)

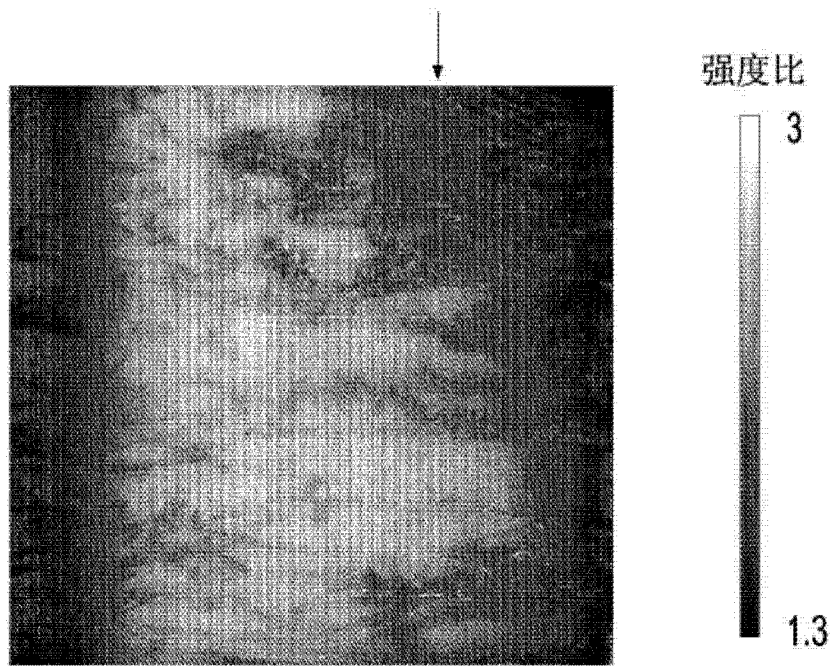


图 14(a)

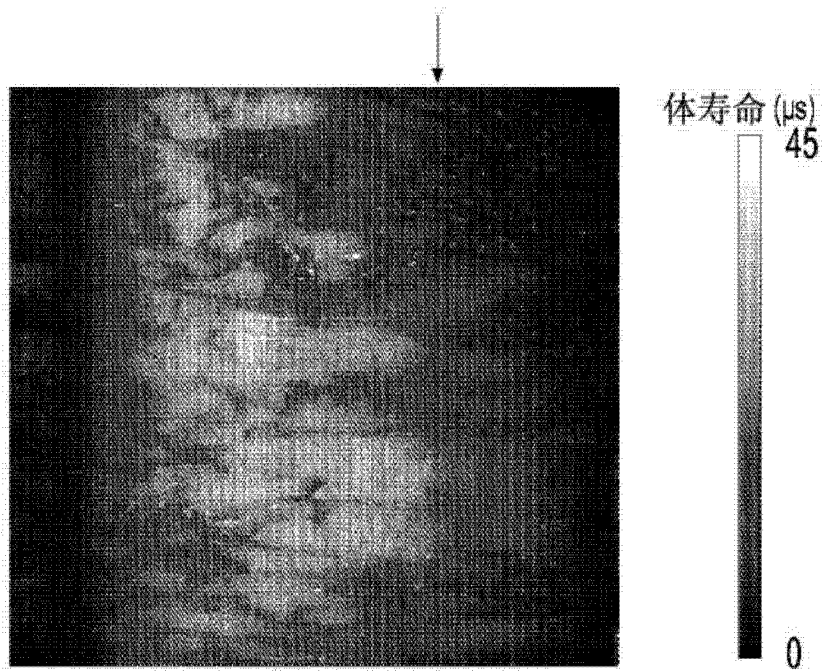


图 14(b)