(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104094389 B
(45)授权公告日 2016.09.07

(21)申请号 201280062241.8
(22)申请日 2012.12.11
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104094389 A
(43)申请公布日 2014.10.08
(30)优先权数据
2011-276215 2011.12.16 JP
2012-253129 2012.11.19 JP
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2014.06.16
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2012/082038 2012.12.11
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2013/089088 JA 2013.06.20
(73)专利权人 国立大学法人东京农工大学
地址 日本东京都
(72)发明人 鲛岛俊之
(74)专利代理机构 北京英特普罗知识产权代理有限公司 11015
代理人 齐永红
(51)Int.Cl.
H01L 21/66(2006.01)
G01N 22/00(2006.01)
(56)对比文件
WO 2011099191 A1,2011.08.18,
US 2005206402 A1,2005.09.22,
US 5177351 A,1993.01.05,
US 4949034 A,1990.08.14,
JP 2011082312 A,2011.04.21,
审查员 叶剑

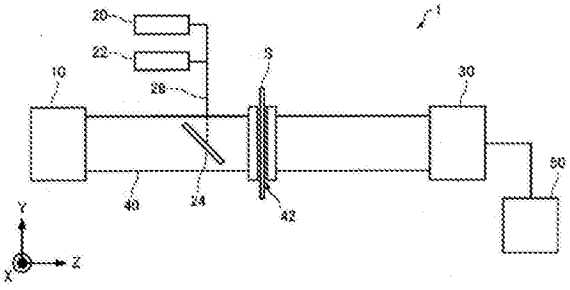
权利要求书2页 说明书10页 附图4页

(54)发明名称

光致载流子寿命测量装置及光致载流子寿命测量方法

(57)摘要

包含:光源(20)、(22),其对半导体衬底(S)照射用于产生光致载流子的、波长不同的光;微波产生部(10),其产生对半导体衬底(S)照射的微波;检测部(30),其检测穿透半导体衬底的微波的强度;以及运算部(50),根据在照射所述至少两种光后检测出的微波强度,计算光的波长各自对应的有效载流子寿命,根据计算出的波长各自对应的有效载流子寿命计算半导体衬底(S)的体内载流子寿命和表面复合速度。



CN 104094389 B

1.一种测量半导体衬底上产生的光致载流子的有效载流子寿命的光致载流子寿命测量装置,其特征在于,包含:

光照射部,其对所述半导体衬底照射用于产生光致载流子的、波长不同的至少两种连续光;

微波产生部,其产生对所述半导体衬底照射的微波;

检测部,其检测穿透所述半导体衬底的微波的强度;

运算部,其根据所述检测部中检测出的微波强度计算有效载流子寿命,

所述运算部

根据在照射所述至少两种连续光后检测出的微波强度,计算所述至少两种连续光的波长各自对应的有效载流子寿命,根据计算出的所述波长各自对应的有效载流子寿命计算所述半导体衬底的体内载流子寿命和表面复合速度;

所述运算部,对以体内载流子寿命及表面复合速度为参数求出的、所述波长各自对应的有效载流子寿命的计算值,以及根据检测出的微波强度而计算出的、所述波长各自对应的有效载流子寿命的测量值,改变所述参数的值,并加以比较,求出所述波长各自对应的有效载流子寿命的计算值与所述波长各自对应的有效载流子寿命的测量值最匹配时所述体内载流子寿命及表面复合速度的值。

2.根据权利要求1所述的光致载流子寿命测量装置,其特征在于:

所述运算部

对半导体衬底表面上形成有钝化膜的基准试样照射周期性脉冲光后,根据检测出的微波强度求出所述基准试样的有效载流子寿命,对所述基准试样照射连续光后根据检测出的微波强度求出所述基准试样的载流子面密度,根据所述有效载流子寿命以及载流子面密度,求出载流子产生率,根据对作为受测试样的半导体衬底照射连续光后检测出的微波强度求出的所述受测试样的载流子面密度,以及所述载流子产生率,计算所述有效载流子寿命的测量值。

3.根据权利要求1或2所述的光致载流子寿命测量装置,其特征在于:

所述至少两种不同的连续光是对所述半导体衬底吸收系数不同的两种连续光。

4.根据权利要求3所述的光致载流子寿命测量装置,其特征在于:

所述至少两种不同的连续光,是对所述半导体衬底吸收系数至少在两倍以上的不同的两种连续光。

5.一种测量半导体衬底上产生的光致载流子的有效载流子寿命的光致载流子寿命测量方法,其特征在于:

对所述半导体衬底照射用于产生光致载流子的波长不同的至少两种连续光,并对所述半导体衬底照射微波;

检测穿透所述半导体衬底的微波的强度;

根据在照射所述至少两种连续光后检测出的微波强度,计算所述至少两种连续光的波长各自对应的有效载流子寿命,根据计算出的所述波长各自对应的有效载流子寿命计算出所述半导体衬底的体内载流子寿命和表面复合速度

对以体内载流子寿命及表面复合速度为参数求出的、所述波长各自对应的有效载流子寿命的计算值,以及根据检测出的微波强度而计算出的、所述波长各自对应的有效载流子

寿命的测量值，改变所述参数的值，并加以比较，求出所述波长各自对应的有效载流子寿命的计算值与所述波长各自对应的有效载流子寿命的测量值最匹配时的所述体内载流子寿命及表面复合速度的值。

6.根据权利要求5所述的光致载流子寿命测量方法，其特征在于：

对半导体衬底表面上形成有钝化膜的基准试样照射周期性脉冲光后，根据检测出的微波强度求出所述基准试样的有效载流子寿命，对所述基准试样照射连续光后根据检测出的微波强度求出所述基准试样的载流子面密度，根据所述有效载流子寿命以及载流子面密度，求出载流子产生率，根据对作为受测试样的半导体衬底照射连续光后检测出的微波强度求出的所述受测试样的载流子面密度，以及所述载流子产生率，计算所述有效载流子寿命的测量值。

7.根据权利要求5或6中任意一项所述的光致载流子寿命测量方法，其特征在于：

所述至少两种不同的连续光是对所述半导体衬底吸收系数不同的两种连续光。

8.根据权利要求7所述的光致载流子寿命测量方法，其特征在于：

所述至少两种不同的连续光，是对所述半导体衬底吸收系数至少在两倍以上的不同的两种连续光。

光致载流子寿命测量装置及光致载流子寿命测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种光致载流子寿命测量装置及光致载流子寿命测量方法。

背景技术

[0002] 对于测量半导体衬底上产生的光致载流子(少数载流子)的有效载流子寿命的方法,已知有一种μ-PCD法(例如参照J.M.Borrego,R.J.Gutmann,N.Jensen,and O.Paz:Solid-Sate Electron.30(1987)195.(非专利文献1))。在该方法中,在向半导体衬底照射微波的状态下,照射极短时间的光脉冲。通过光脉冲产生的载流子反射微波,通过测量反射强度的时间变化来测量光致载流子的有效载流子寿命。

[0003] 再有,对于测量半导体衬底的光致载流子的有效载流子寿命的方法,已知一种QSSPC方法(例如参照G.S.Kousik,Z.G.Ling,and P.K.Ajmera:J.Appl.Phys.72(1992)141.(非专利文献2))。在该方法中,面对半导体衬底配置电感线圈,施加RF频率的电磁波。之后,向半导体衬底照射极短时间的光脉冲。通过光脉冲产生的载流子反射RF频率的电磁波,测量反射波的时间变化作为线圈中流通的电流的变化,由此来测量光致载流子的有效载流子寿命。

[0004] 再有,对于测量半导体衬底的光致载流子的有效载流子寿命的方法,已知一种微波光干涉吸收法(例如参照T.SAMESHIMA,H.HAYASAKA,and T.HABA:Jpn.J.Appl.Phys.48(2009)021204-1-6.(非专利文献3))。在该方法中,在波导管所形成的微波干涉仪中插入半导体衬底,在照射微波的状态下照射连续光。通过连续光引起的载流子吸收微波,测量此时微波的透光率减少情况,由此测量光致载流子的有效载流子寿命。

[0005] 进而,在非专利文献3中记载的方法中,已知一种向半导体衬底照射周期性间歇脉冲光的方法(例如参照Toshiyuki Sameshima.Tomokazu Nagao,Shinya Yoshidomi,Kazuya Kogure,and Masahiko Hasumi:“Minority Carrier Lifetime Measurements by Photo-Induced Carrier Microwave Absorption Method”,Jpn.J.Appl.Phys.50(2011)03CA02.(非专利文献4),国际公开第11/099191号小册子(专利文献1))。在该方法中,通过改变脉冲光的照射时间和周期,无论照射光强度如何都可求出有效载流子寿命。

发明内容

[0006] 发明要解决的问题

[0007] 通过上述各种技术,可测量出半导体衬底的光致载流子的有效载流子寿命。光致载流子的有效载流子寿命通常由半导体衬底固有的寿命(体内载流子寿命))和半导体表面存在的缺陷所引发的表面复合速度来决定。在有效利用太阳能电池、CCD等光致载流子的器件制造中,增加体内载流子寿命并使表面复合速度减小,而使有效载流子寿命增加是非常重要的。之后,在效载流子寿命的测量装置(分析仪)中,优选体内载流子寿命及表面复合速度可通过实验得到。

[0008] 但是,在现有技术中,虽然可精确求出有效载流子寿命,但没有确定体内载流子寿

命及表面复合速度的装置。即在现有技术中，通常方法是假设体内载流子寿命及表面复合速度中的一项而求另一项。是硅等间接能带型结晶半导体的情况下，由于预想体内载流子寿命较长，所以通常假定体内载流子寿命足够长，由测量得到的有效载流子寿命来求出表面复合测量。但是，假定的体内载流子寿命存在不确定性，在进行精密分析上存在问题。

[0009] 鉴于以上问题，本发明的目的是提供一种可精度良好地测量半导体衬底的体内载流子寿命及表面复合速度的光致载流子寿命测量装置及光致载流子寿命测量方法。

[0010] 解决技术问题的手段

[0011] (1)本发明是一种测量半导体衬底上产生的光致载流子的有效载流子寿命的光致载流子寿命测量装置，其特征在于包含：

[0012] 光照射部，其对所述半导体衬底照射用于产生光致载流子的波长不同的至少两种光；

[0013] 微波产生部，其产生对所述半导体衬底照射的微波；

[0014] 检测部，其检测穿透所述半导体衬底的微波的强度；

[0015] 运算部，其根据所述检测部中检测出的微波强度计算有效载流子寿命；

[0016] 所述运算部

[0017] 根据在照射所述至少两种光后检测出的微波强度，计算所述至少两种光的波长各自对应的有效载流子寿命，根据计算出的所述波长各自对应的有效载流子寿命计算出所述半导体衬底的体内载流子寿命和表面复合速度。

[0018] 再有，本发明是一种测量半导体衬底上产生的光致载流子的有效载流子寿命的光致载流子寿命测量方法，其特征在于：

[0019] 对所述半导体衬底照射用于产生光致载流子的波长不同的至少两种光，并对所述半导体衬底照射微波；

[0020] 检测穿透所述半导体衬底的微波的强度；

[0021] 根据在照射所述至少两种光后检测出的微波强度，计算所述至少两种光的波长各自对应的有效载流子寿命，根据计算出的所述波长各自对应的有效载流子寿命计算出所述半导体衬底的体内载流子寿命和表面复合速度。

[0022] 采用本发明，根据在照射波长不同的至少两种光后检测出的微波强度计算至少两种光的波长对应的有效载流子寿命，根据计算出的所述波长对应的有效载流子寿命计算出所述半导体衬底的体内载流子寿命和表面复合速度，由此可精度良好地测量体内载流子寿命及表面复合速度。

[0023] (2)再有本发明涉及的光致载流子寿命测量装置及光致载流子寿命测量方法，也可为

[0024] 对以体内载流子寿命及表面复合速度为参数求出的、所述波长各自对应的有效载流子寿命的计算值，以及根据检测出的微波强度而计算出的、所述波长各自对应的有效载流子寿命的测量值改变所述参数的值并加以比较，求出所述波长各自对应的有效载流子寿命的计算值与所述波长各自对应的有效载流子寿命的测量值最匹配时所述体内载流子寿命及表面复合速度的值。

[0025] 这样，不假定半导体衬底的体内载流子寿命及表面复合速度这两项中的一项，就可测量这两项。

[0026] (3)再有本发明涉及的光致载流子寿命测量装置及光致载流子寿命测量方法，也可为

[0027] 对以体内载流子寿命的深度分布及表面复合速度为参数求出的、所述波长各自对应的有效载流子寿命的计算值，以及根据检测出的微波强度而计算出的、所述波长各自对应的有效载流子寿命的测量值，改变所述参数的值并加以比较，求出所述波长各自对应的有效载流子寿命的计算值与所述波长各自对应的有效载流子寿命的测量值最匹配时所述体内载流子寿命的深度分布及表面复合速度的值。

[0028] 这样，不假定半导体衬底的体内载流子寿命的深度分布及表面复合速度这两项中的一项，就可测量这两项。

[0029] (4)再有本发明涉及的光致载流子寿命测量装置及光致载流子寿命测量方法，对半导体衬底表面上形成有钝化膜的基准试样照射周期性脉冲光后，根据检测出的微波强度求出所述基准试样的有效载流子寿命，对所述基准试样照射连续光后根据检测出的微波强度求出所述基准试样的载流子面密度，根据所述有效载流子寿命以及载流子面密度，求出载流子产生率，根据向作为受测试样的半导体衬底照射连续光后检测出的微波强度求出的所述受测试样的载流子面密度，以及所述载流子产生率，计算出所述有效载流子寿命的测量值。

[0030] 这样，可精度良好地求出有效载流子寿命的测量值。

[0031] (5)再有本发明涉及的光致载流子寿命测量装置及光致载流子寿命测量方法，

[0032] 所述至少两种不同的光也可以是对所述半导体衬底吸收系数不同的两种光。

[0033] (6)再有本发明涉及的光致载流子寿命测量装置及光致载流子寿命测量方法，所述至少两种不同的光，也可以是对所述半导体衬底吸收系数至少在两倍以上的不同的两种光。

附图说明

[0034] 图1是本实施方式的测量装置(光致载流子寿命测量装置)的一个例子的结构示意图。

[0035] 图2是结晶硅的光吸收系数的波长引起的变化的图。

[0036] 图3用于说明采用本实施方式的测量装置进行测量后的半导体衬底。

[0037] 图4是采用本实施方式的测量装置的有效载流子寿命的测量结果图。

[0038] 图5A是采用本实施方式的测量装置的载流子体积浓度的测量结果图。

[0039] 图5B是采用本实施方式的测量装置的载流子体积浓度的测量结果图。

具体实施方式

[0040] 以下对本实施方式进行说明。以下说明的本实施方式并不对权利要求书中记载的本发明内容进行不当限定。另外，本实施方式中说明的全部结构并不都是本发明必须的构成要件。

[0041] 1.测量原理

[0042] 本实施方式的测量方法及测量装置中，对作为受测试样的半导体衬底照射吸收系数不同的至少两种光。

[0043] 例如，对半导体衬底照射了具有较大吸收系数的短波长光后，光被半导体衬底的极表面(極表面)区域吸收。由于半导体衬底的表面复合速度大时，半导体衬底的表面区域上产生的光致载流子迅速复合并消失，所以存在于衬底内的载流子的浓度变小。从而，对半导体衬底照射了微波后，微波的吸收度变小(透光率变大)，有效载流子寿命变小。

[0044] 另一方面，对半导体衬底照射了具有较小吸收系数的长波长光后，光深度进入到半导体衬底内部。因此，表面复合速度的影响变小，半导体衬底的体内载流子寿命足够大时，与短波长光照射时相比载流子浓度变大，有效载流子寿命变长。

[0045] 即在有效载流子寿命受表面复合速度限制的情况下(表面复合速度大的情况下)，测量的有效载流子寿命具有波长依赖性，由照射了短波长光后检测出的微波透光率测量得到的有效载流子寿命，以及由照射了长波长光后检测出的微波透光率测量得到的有效载流子寿命，变为不同的值。

[0046] 另外，在半导体衬底表面进行了钝化处理，有效载流子寿命受体内载流子寿命限制的情况下(表面复合速度足够小的情况下)，由于光致载流子在半导体衬底中随处以相同比例消失，所以测量的有效载流子寿命不具有波长依赖性。

[0047] 这样，对半导体衬底照射了波长不同的至少两种光后分别测量有效载流子寿命，通过将测量出的至少两种有效载流子寿命加以分析，可对半导体衬底的表面复合速度及体内载流子寿命做出评价。

[0048] 2.结构

[0049] 图1是本实施方式的测量装置(光致载流子寿命测量装置)的一个例子结构示意图。本实施方式的测量装置1构成为一种测量受测试样半导体衬底S的有效载流子寿命，以及对测量出的有效载流子寿命加以分析并测量半导体衬底S的体内载流子寿命和表面复合速度的装置。

[0050] 测量装置1包含：微波产生部10，其产生入射到半导体衬底S的微波；光源20、22(光照射部)，其照射光(诱导光)，所述光用于在半导体衬底S上产生光致载流子；检测部30，其检测从半导体衬底S透过的微波的强度；波导管40，其将微波产生部10产生的微波传送到检测部30；以及运算部50。

[0051] 波导管40上设有插缝42，所述插缝42中插入半导体衬底S。再有，在相比波导管40内部的插缝42更靠近微波产生部10侧安装有反射板24，所述反射板24用于使光源20、22发出的光入射到半导体衬底S。光源20、22发出的光通过光纤26由反射板24扩散反射并入射到半导体衬底S。反射板24例如由特氟龙(注册商标)板构成。另外，也可设置导光板来替代反射板24，使光源20、22发出的光入射到半导体衬底S。

[0052] 光源20、22分别例如由激光光源构成，产生波长各不相同的光(对半导体衬底S的吸收系数不同的光)。光源20是用于对导体衬底S照射短波长光(例如使半导体衬底S的表面区域产生载流子的光)的光源，光源22是用于对半导体衬底S照射长波长光(例如使半导体衬底S的内部区域产生载流子的光)的光源。

[0053] 运算部50(计算机)根据检测部30检测出的微波的强度信息，计算半导体衬底S的光致载流子的有效载流子寿命，根据计算出的有效载流子寿命进行运算处理来计算出半导体衬底S的体内载流子寿命和表面复合速度。

[0054] 运算部50通过在光源20发出的短波长光照射半导体衬底S后检测出的微波的强度

信息求出微波的透光率变化，根据求出的透光率的变化，计算出光源20发出的光照射半导体衬底S后(与光源20发出的光的波长对应)的有效载流子寿命。再有，运算部50通过在光源22发出的长波长光照射半导体衬底S后检测出的微波的强度信息求出微波的透光率变化，根据求出的透光率的变化，计算出光源22发出的光照射半导体衬底S后(与光源22发出的光的波长对应)的有效载流子寿命。

[0055] 之后，运算部50分析并求出与测量出的两个有效载流子寿命τ_{eff}(光源20发出的光照射半导体衬底S后有效载流子寿命的测量值，以及光源22发出的光照射半导体衬底S后有效载流子寿命的测量值)最匹配的体内载流子寿命τ_b，以及表面复合速度(照射诱导光的面(照射面)侧的表面复合速度S_{top}及照射面的相反侧的表面复合速度S_{rear})。另外，体内载流子寿命τ_b和表面复合速度S_{top}、S_{rear}的分析考虑生光载流子的穿透深度来进行。

[0056] 以下，对本实施方式的测量装置及测量方法中采用的体内载流子寿命τ_b和表面复合速度S_{top}、S_{rear}的分析方法进行说明。

[0057] 对半导体衬底的表面照射连续光后，在距离表面(照射面)深度x处的稳定的光致少数载流子体积浓度n(x)按照下面的微分方程，其中半导体衬底中的少数载流子的扩散系数设为D。

[0058] 【式1】

[0059] $$D\frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2}+G(x)-\frac{n(x)}{\tau_b}=0 \qquad (1)$$

[0060] 此处，G(x)是深度x处每单位面积的少数载流子的产生率。G(x)依赖半导体衬底的光吸收系数α，光吸收系数α依赖光波长。图2中例示采用结晶硅(半导体衬底的一个例子)的光吸收系数随光波长的变化。如图2所示，结晶硅对紫外线显示出非常大的吸收系数。因此，紫外线被结晶硅的极表面吸收。相反，对与带隙接近的红外线吸收系数变小。因此红外线深度进入到结晶硅半导体内。

[0061] 对半导体衬底表面照射每单位面积的强度I_0的光后，深度x处的每单位体积的光强度J(x)用光吸收系数α可表示为如下的方程式。

[0062] 【式2】

[0063] $$J(x)=J_0\exp(-ax) \qquad (2)$$

[0064] 此处，J_0是I_0/α，是半导体衬底表面的光体积强度。G(x)与J(x)成正比，光强度越大G(x)越大，产生很多载流子。G(x)可使用J(x)、与波长对应的光子能量hv(h是普朗克常数，v是光的频率)、载流子生成内部量子效率η表示为如下方程式。

[0065] 【式3】

[0066] $$G(x)=J(x)\times h^{-1}\times v^{-1}\times\eta \qquad (3)$$

[0067] 存在于半导体衬底表面的缺陷导致的表面复合速度S_{top}、S_{rear}x作为半导体衬底表面的微分系数的边界条件，如下述方程式所示。

[0068] 【式4】

[0069] $$D\frac{\partial n(x)}{\partial x}\Big|_{x=0}=S_{top}n(0) \qquad (4)$$

[0070] $$D\frac{\partial n(x)}{\partial x}\Big|_{x=d}=-S_{rear}n(d) \qquad (5)$$

[0071] 此处，d是半导体衬底的厚度。

[0072] 即以式(4)、式(5)作为边界条件，用与波长对应的G(x)解出式(1)，由此可求出载流子体积浓度n(x)。

[0073] 之后，在半导体衬底的深度方向对n(x)进行积分的载流子面密度N(单位：cm^{-2})和在半导体衬底的深度方向对G(x)进行积分的每单位面积的载流子产生率H(单位：$cm^{-2}s^{-1}$)如下述方程式所示。

[0074] 【式5】

[0075] $$N=\int_0^d n(x)dx \qquad (6)$$

[0076] $$H=\int_0^d G(x)dx \qquad (7)$$

[0077] 之后，有效载流子寿命τ_{eff}通过下述方程式求出。

[0078] 【式6】

[0079] $N=H\times\tau_{eff}$ (8)

[0080] 例如，以有限元差分法将式(1)～(5)程序化，以τ_b、S_{top}及S_{rear}为参数求n(x)，对求出的n(x)进行积分求出N。再有，对G(x)进行积分求出H，将求出的N和H代入式(8)求出有效载流子寿命τ_{eff}的计算值。另外，照射半导体衬底吸收系数较大的波长带的光的情况下，τ_{eff}如下述方程式所示。

[0081] 【式7】

[0082] $$\tau_{eff}=\tau_b\frac{\sqrt{\frac{D}{\tau_b}}\left(1-\exp\left(-\frac{d}{\sqrt{D\tau_b}}\right)\right)\left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}}+S_{rear}+\left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}}-S_{rear}\right)\exp\left(-\frac{d}{\sqrt{D\tau_b}}\right)\right)}{\left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}}+S_{rear}\right)\left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}}+S_{top}\right)-\left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}}-S_{top}\right)\left(\sqrt{\frac{D}{\tau_b}}-S_{rear}\right)\exp\left(-\frac{2d}{\sqrt{D\tau_b}}\right)} \qquad (9)$$

[0083] 如上所示，比较以τ_b、S_{top}及S_{rear}为参数通过计算求出的τ_{eff}的计算值(理论值)和通过检测出的微波强度测量出的τ_{eff}的测量值，由此求出最有可能的τ_b、S_{top}及S_{rear}。在本实施方式中，照射波长各不相同的多种光，随照射的光(诱导光)的波长导致G(x)的值出现差异。因此，τ_{eff}的计算值因诱导光的波长而有所不同。从而，改变作为参数的τ_b、S_{top}及S_{rear}的值，并比较对应照射的光的各波长计算求出的τ_{eff}的计算值和对应照射的光的各波长测量出的τ_{eff}的测量值，求出τ_{eff}的计算值与τ_{eff}的测量值最匹配时τ_b、S_{top}及S_{rear}的值。

[0084] 例如，在图1的结构中，改变参数值并对根据光源20的光的波长计算的τ_{eff}的计算值和照射光源20发出的光后τ_{eff}的测量值加以比较，且改变参数值并对根据光源22的光的波长计算出的τ_{eff}的计算值和照射光源22发出的光后τ_{eff}的测量值加以比较，由此求出最有可能的τ_b、S_{top}及S_{rear}。

[0085] 另外，式(1)的τ_b变为距表面深度x处的体内载流子寿命$\tau_b(x)$时，通过发展了上述有限元法的数值分析可求出体内载流子寿命的深度分布(每深度x的体内载流子寿命τ_b)。这种情况下，将半导体衬底的厚度d分成M(M是正整数)层，对各层的厚度d/M，将式(1)的微分式变为差分式。之后，在表面和里面设置式(4)和式(5)的边界条件。具体是假定n(d)满足式(5)的边界条件，对nM(第M层的载流子体积浓度)、nM-1(第M-1层的载流子体积浓度)、……n1(第1层的载流子体积浓度)逐渐改变初始值以使其满足式(1)的差分式，并进行

计算。之后，将最终满足式(4)的边界条件的值作为数值解。

[0086] 接着，对有效载流子寿命τ_{eff}的具体测量方法进行说明。通过式(8)，只要知道载流子面密度N和载流子产生率H就可精度良好地求出τ_{eff}的测量值。但是，如下述方程式所示，H取决于入射光的光子通量F、载流子生成内部量子效率η、光反射损耗R。

[0087] 【式8】

[0088] $$H=F\times\eta\times(-R) \quad (10)$$

[0089] 进而，η取决于半导体衬底，R取决于折射率、光吸收系数、薄膜厚度、表面形状，因此，难以精度良好地测量H。因此，为正确求出H，使用了τ_{eff}的测量法，所述τ_{eff}的测量法采用专利文献1中公开的周期性脉冲法。周期性脉冲法中，可采用与连续光照射同水平的微弱的光照射来测量τ_{eff}。但是，周期性脉冲法不适用测量不足10μ的非常小的τ_{eff}。因此，开发了一种τ_{eff}的测量方法，所述τ_{eff}的测量方法使用与受测试样类似的基准试样。

[0090] 此方法中，受测试样是结晶硅的情况下，使用硅单晶作为基准试样。再有，在基准试样的表面形成热氧化膜等钝化膜，以便降低表面的载流子复合缺陷得到大的τ_{eff}。另外，在受测试样上也形成有氧化膜的情况下，设定基准试样的热氧化膜与受测试样的氧化膜的薄膜厚度相同。再有，受测试样是裸露半导体的情况下，形成不影响反射率的薄膜氧化膜(例如厚度为10nm的热氧化膜)。再有，受测试样的表面上有凹凸纹理等的情况下，在基准试样上也形成同样的纹理。

[0091] 首先，采用周期性脉冲法求出基准试样的τ_{eff}。另外，通常τ_{eff}是取决于光强度而变化的，所以将周期性脉冲法的平均光强度设置为与下文所述连续光的光强度相同。接着，对基准试样照射连续光进行微波吸收测量求出基准试样的载流子面密度N。之后，将N和τ_{eff}的测量值代入式(8)，求出连续光照射中的载流子产生率H。

[0092] 接着，对受测试样照射连续光进行微波吸收测量求出受测试样的载流子面密度N。之后，将受测试样的载流子面密度N和载流子产生率H的测量值代入式(8)，求出受测试样的τ_{eff}。采用此方法，使用正确的H，可精度良好地测量受测试样的τ_{eff}。

[0093] 3.测量结果

[0094] 3-1.第一实施例

[0095] 以表面做过钝化处理的半导体衬底为第一试样，对第一试样进行加热处理，得到的产品作为第二试样，采用本实施方式的测量装置进行各试样的有效载流子寿命、体内载流子寿命及表面复合速度的测量。

[0096] 本测量中，如图3所示，以100nm厚的热氧化膜对500μm厚的n型硅衬底进行两面镀膜，使用该n型硅衬底作为第一试样。再有，对图3所示的第一试样进行处理(加热处理)，即以$5\times10^4W/cm^2$的高强度对其整个表面照射波长940nm的激光，使用处理后的产品作为第二试样。现有文献中明确记载有使用这样的激光照射进行的加热处理，以此来降低有效载流子寿命的内容。

[0097] 再有，本测量中，使用产生9.35GHz的微波的振荡器作为微波产生部10。再有，使用波长635nm的激光光源作为短波长光源20，使用波长980nm的激光光源作为长波长光源22。已知波长635nm的光对硅的穿透深度减小为2.7μm，被硅衬底的极表面区域吸收，波长980nm的光对硅的穿透深度增加为90μm，侵入到硅衬底的内部区域。

[0098] 图4是对第一试样和第二试样分别测量照射波长635nm的光后的有效载流子寿命

和照射波长980nm的光后的有效载流子寿命的测量结果。图中白点是照射波长980nm的光后的有效载流子寿命，图中黑点是照射波长635nm的光后的有效载流子寿命。

[0099] 如图4所示，对实施了热氧化膜镀膜的n型硅衬底(第一试样)，有效载流子寿命增加为2ms，用635nm和980nm两波长的寿命值几乎相同。与之相对，对采用激光照射进行了加热处理的n型硅衬底(第二试样)，照射波长635nm的光时有效载流子寿命为5μs，照射波长980nm的光时有效载流子寿命为35μs。即证实了通过采用激光照射的加热处理，有效载流子寿命减少，且与照射短波长光时相比照射长波长光时的有效载流子寿命增加

[0100] 接着，通过上述的分析法对第一试样比较测量出的两个有效载流子寿命的测量值，以及以635nm和980nm两波长分别计算的有效载流子寿命的计算值，求出与两个有效载流子寿命的测量值最匹配的体内载流子寿命τ_b和表面复合速度S_{top}、S_{rear}。其结果是，体内载流子寿命τ_b是20ms，第一试样的表面复合速度S_{top}、S_{rear}分别为12.3cm/s。

[0101] 同样，对第二试样采用上述分析法，求出与测量出的两个有效载流子寿命值最匹配的体内载流子寿命τ_b和表面复合速度S_{top}、S_{rear}。其结果是，发现第二试样的照射面的表面复合速度S_{top}变为25000cm/s，采用激光照射进行加热处理照射面的表面复合速度变大。

[0102] 图5A、图5B示出了从第二试样的分析結果得出的载流子体积浓度n(x)的深度x分布。图5A是照射波长635nm的光时的分布，图5B是照射波长980nm的光时的分布。

[0103] 如图5A所示，在照射波长635nm的光的情况下，由于硅衬底的光吸收系数较大，在衬底表面上产生载流子，所以较大表面复合速度S_{top}导致载流子体积浓度变小。再有，如图5B所示，在照射波长980nm的光的情况下，由于硅衬底的光吸收系数较小，光深度进入硅衬底内，在硅体内产生载流子。因此，通过拡散载流子在到达表面的时间里得以存活，载流子体积浓度变大，有效载流子寿命也变大。

[0104] 像这样采用本实施方式的测量装置及测量方法，不假定半导体衬底的体内载流子寿命及表面复合速度两项中的一项，就可对这二项进行测量。

[0105] 3-2.第二实施例

[0106] 本实施例中，使用镀有热氧化膜的700μm厚的硅衬底为试样。对该硅衬底向硅原子以70keV实施离子注入(注入量：$1\times10^{14}cm^{-2}$)。对本试样，以波长635nm及波长980nm的光照射，测量离子注入前和离子注入后的有效载流子寿命τ_{eff}。之后，采用有限元法分析测量结果，求出表面复合速度S_{top}、S_{rear}和体内载流子寿命的深度分布$\tau_b(x)$。对体内载流子寿命，将衬底的厚度分成多层，对各层求出τ_b。测量结果和分析結果在表1中示出。

[0107] 【表1】

[0108]

试样	测量值		分析值			
	τ_{eff} (635nm)	τ_{eff} (980nm)	S_{top} (cm/s)	S_{rear} (cm/s)	τ_b (第一层)	τ_b (第二层)
离子注入前	1.6E-04	1.7E-04	190	190	1.0E-03	
离子注入后	9.0E-07	6.0E-06	10000	190	1.0E-05	1.0E-03

[0109] 在表1中，第一层是距表面深度x为0～490μm的层，第二层是距表面深度x为490～700μm的层。

[0110] 离子注入前的试样中，照射波长635nm的光的情况和照射波长980nm的光的情况都

得到了较大的τ_{eff}。分析该测量值，结果S_{top}、S_{rear}的值为190cm/s，τ_b的值在衬底的厚度方向整体为1ms时与测量值非常相符。

[0111] 与之相对，离子注入后的试样中，τ_{eff}大幅下降，尤其是照射波长980nm的光时的τ_{eff}很小。这显示出从硅表面侧深入内部τ_b下降。分析该测量值，结果发现τ_b从表面到深入490μm的范围内下降到10μs。显然，采用离子注入硅原子注入的深度至多为0.1μm左右，所以采用本测量，高能离子带来的载流子复合缺陷形成直到远深于注入离子深度的部分。

[0112] 3-3.第三实施例

[0113] 本实施例中，以100nm厚的热氧化膜对500μm厚的n型硅衬底进行两面镀膜，使用其作为试样。以输出50w的氩等离子体对硅衬底照射1分钟。对本试样，以波长635nm及波长980nm的光照射，测量等离子体处理前和等离子体处理后的有效载流子寿命τ_{eff}。之后，采用有限元法来分析测量结果，求出表面复合速度S_{top}、S_{rear}和体内载流子寿命τ_b。测量结果和分析結果在表2中示出。

[0114] 【表2】

[0115]

试样	测量值		分析值		
	τ_{eff} (635nm)	τ_{eff} (980nm)	S_{top} (cm/s)	S_{rear} (cm/s)	τ_b
等离子体处理前	3.10E-03	3.10E-03	8	8	0.1
等离子体处理后	6.00E-06	4.20E-05	8000	8	0.1

[0116] 等离子体处理前的试样中，照射波长635nm的光的情况和照射波长980nm的光的情况都得到了较大的τ_{eff}。分析该测量值，结果S_{top}、S_{rear}的值为8cm/s，τ_b的值在衬底的整个厚度方向为100ms时，与测量值非常相符。

[0117] 与之相对，等离子体处理后的试样中，τ_{eff}大幅下降，尤其是照射波长635nm的光时的τ_{eff}很小。这显示出硅表面侧局部存在缺陷。分析该测量值，结果发现τ_b和S_{rear}的值与等离子体处理前无变化，只有表面的复合速度S_{top}变大为8000cm/s。显然，采用本测量，通过等离子体氩处理在硅表面上形成载流子复合缺陷。

[0118] 4.变形例

[0119] 另外，本发明并不受上述实施方式限制，可进行各种改变。本发明包含与实施方式所说明的结构实质上相同的结构(例如功能、方法及结果相同的结构，或目的及效果相同的结构)。再有，本发明包含将实施方式中说明的结构的非必要部分进行了替换的结构。再有，本发明包含与实施方式中说明的结构发挥相同作用效果的结构或可达到相同目的的结构。再有，本发明包含在实施方式中说明的结构中附加公知技术的结构。

[0120] 例如，图1的测量装置1也可具有使半导体衬底S在图1中X轴方向上移动的X轴移动台，以及使半导体衬底S在图1中Y轴方向上移动的Y轴移动台。如此构成，就能对半导体衬底S在XY平面上的任意位置进行测量。再有，也可使测量装置1构成为对光源20、22发出的光进行脉冲调制，锁定检测微波强度。再有，测量装置1也可具有两个以上光源，所述光源照射用于产生光致载流子的、波长各不相同的光。

[0121] 附图标记说明

[0122] 1 测量装置、10 微波产生部、20 光源、22 光源、24 反射板、26 光纤、30 检测部、40 波导管、42 插缝、50 运算部。

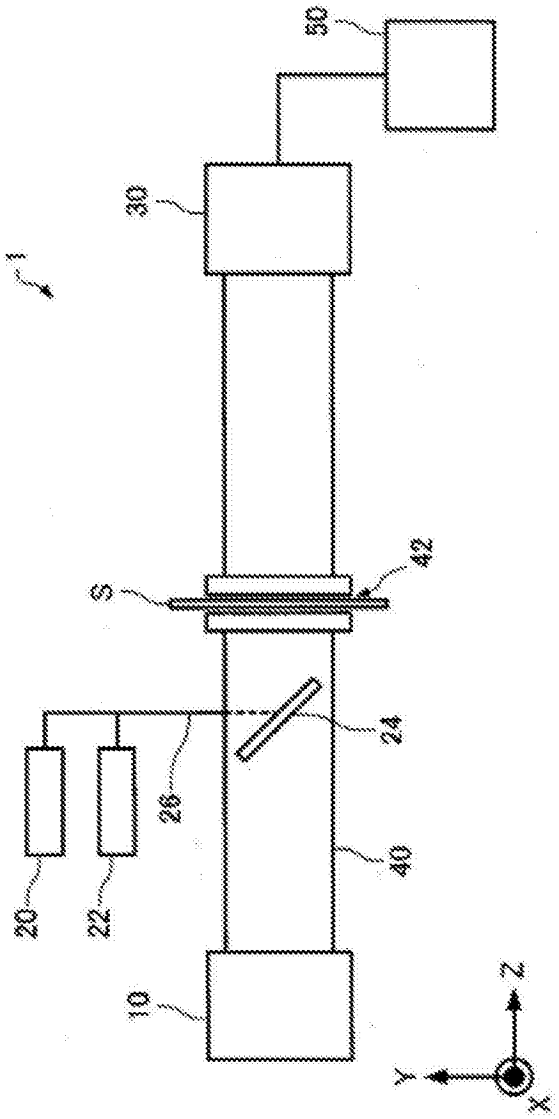


图1

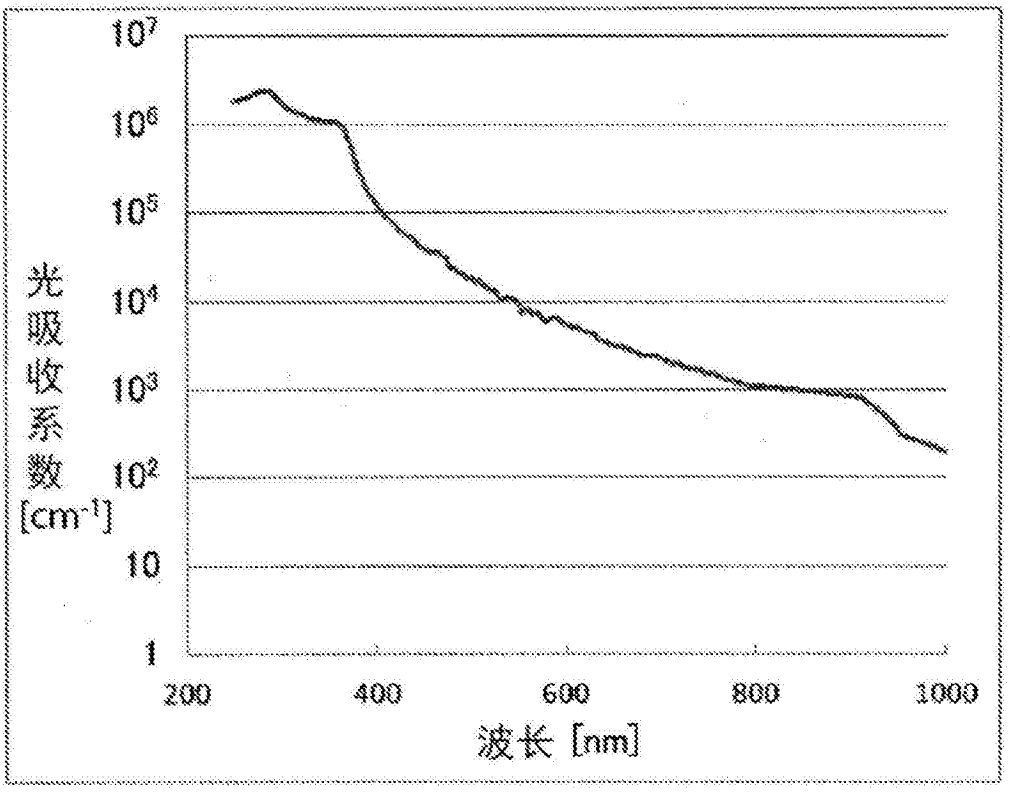

10^7
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
光吸收系数 [cm^{-1}]
200
400
600
800
1000
波长 [nm]

图2

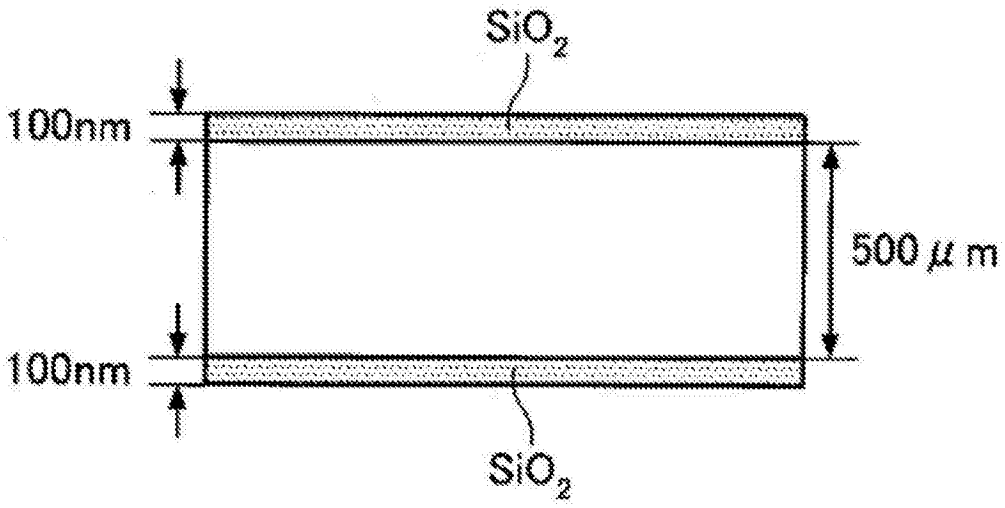

SiO_2
100nm
500 μm
100nm
SiO_2

图3

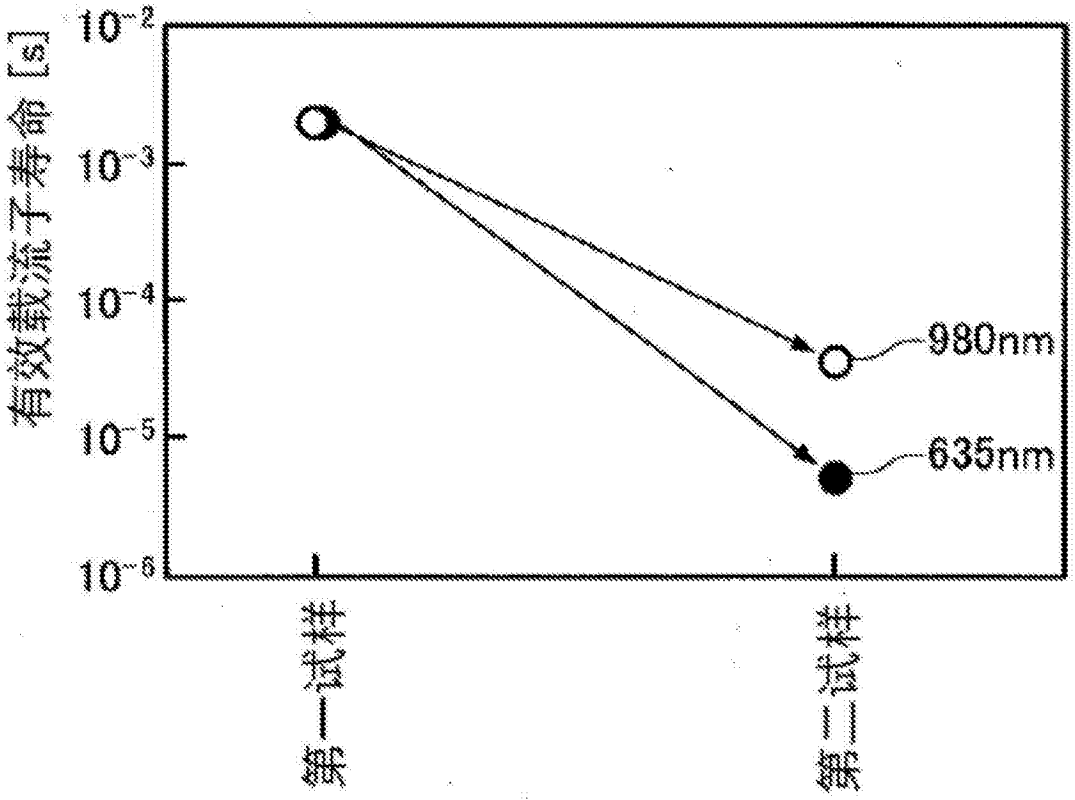

有效载流子寿命 [s]
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
980nm
635nm
井阱一
井阱二

图4

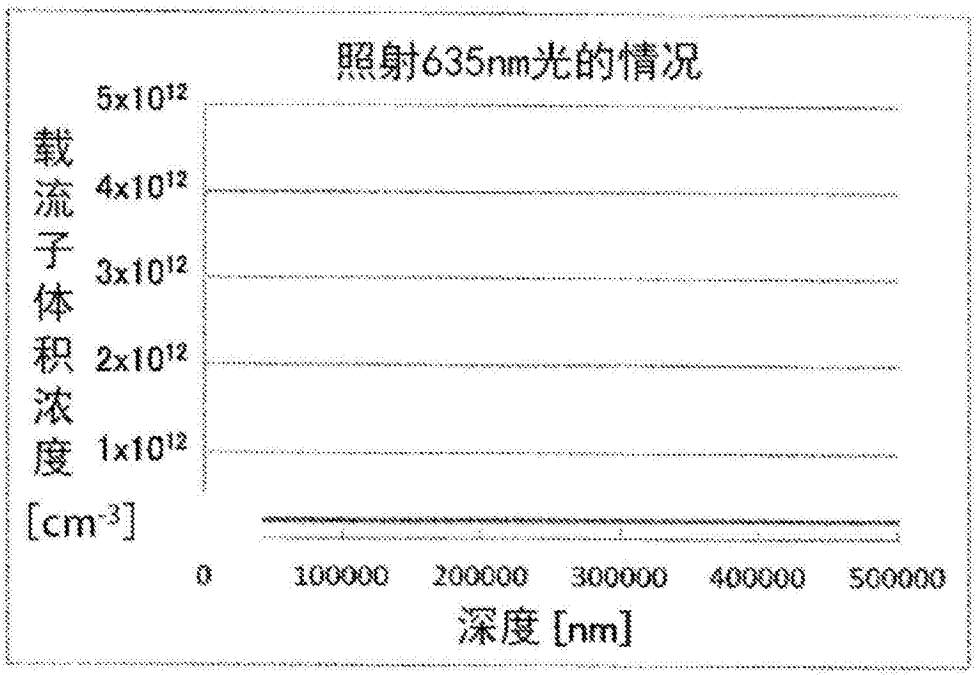

照射635nm光的情况
载流子体积浓度 [cm^{-3}]
$5x10^{12}$
$4x10^{12}$
$3x10^{12}$
$2x10^{12}$
$1x10^{12}$
0
100000
200000
300000
400000
500000
深度 [nm]

图5A

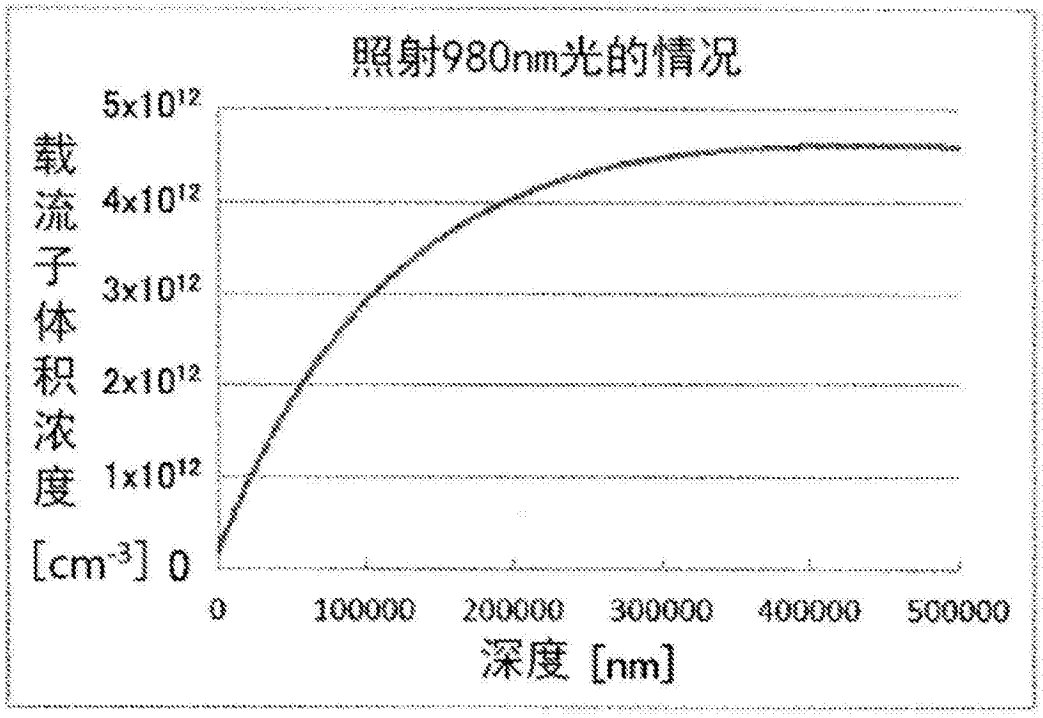

照射980nm光的情况
载流子体积浓度 [cm-3]
5x10^12
4x10^12
3x10^12
2x10^12
1x10^12
0
0
100000
200000
300000
400000
500000
深度 [nm]

图5B