

(19) Japan Patent Office (JP)

(12) Published Unexamined Patent Application (A)

(11) Publication No. of Unexamined Application:

**Kokai No. 2008-311562
(P2008-311562A)**

(43) Date of Publication of Unexamined Application:

December 25, 2008 (2008.12.25)

(51) Int. Cl.	FI	Theme Code (Reference)
H01L 31/10 (2006.01)	H01L 31/10 A	5F049
Request for Examination:		Not requested
Number of Claims:		10
Method of Filing:		OL (Online)
Total Number of Pages:		18
(21) Patent Application No.: 2007-160000 (P2007-160000)	(71) Applicant: 000005821 PANASONIC CORP. 1006 Oaza Makado, Makado-shi, Osaka-fu	
(22) Filing Date: June 18, 2007 (2007.6.18)	(74) Agent: 100077931 Hiroshi MAEDA, patent attorney	
	(74) Agent: 100110939 Hiroshi TAKEUCHI, patent attorney	
	(74) Agent: 100110940 Takahisa SHIMADA, patent attorney	
	(74) Agent: 100113262 Yuji TAKEUCHI, patent attorney	
	(74) Agent: 100115059 Katsumi IMAE, patent attorney	
	(74) Agent: 100115691 Atsushi FUJITA, patent attorney	

Continued on last page

(54) Title of Invention

LIGHT-RECEIVING ELEMENT

(57) Abstract

Problem

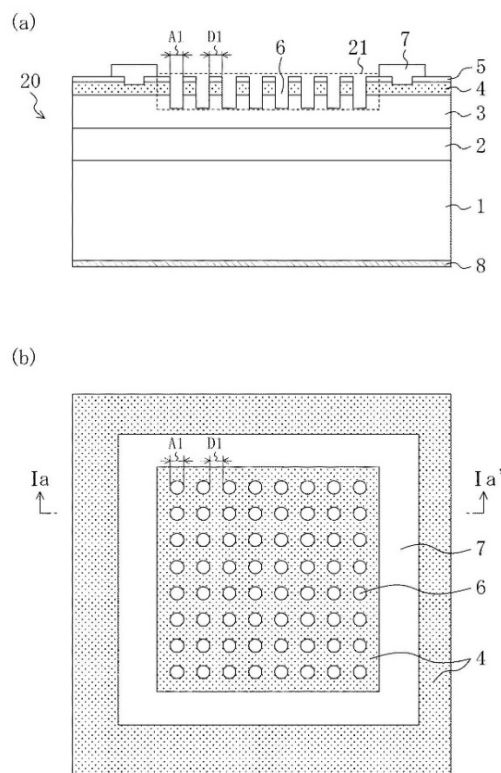
To achieve a balance between high sensitivity and high response speed in a light-receiving element compatible with short-wavelength light.

Solution

A light-receiving element 20 comprises: a semiconductor substrate 1; a light-absorbing layer that is formed on the semiconductor substrate 1, includes a low-concentration impurity layer, and absorbs light of a prescribed wavelength band; and a high-concentration impurity layer 4 that is formed on the light-absorbing layer and has a higher impurity concentration than the low-concentration impurity layer. A plurality of low-refractive-index regions 6 having a lower refractive index than the high-concentration impurity layer with respect to light is arrayed with a constant spacing in at least the high-concentration impurity layer, thereby forming a photonic crystal portion 21 that transmits light of the prescribed wavelength band as a result of having a periodic refractive index distribution in a principal-plane direction of the semiconductor substrate 1.

Selected Figure

FIG. 1



CLAIMS

1. A light-receiving element comprising:

a semiconductor substrate;

a light-absorbing layer that is formed on the semiconductor substrate, includes a low-concentration impurity layer, and absorbs light of a prescribed wavelength band; and

a high-concentration impurity layer that is formed on the light-absorbing layer and has a higher impurity concentration than the low-concentration impurity layer;

wherein a plurality of low-refractive-index regions having a lower refractive index than the high-concentration impurity layer with respect to light of the prescribed wavelength band is arrayed with a constant spacing in at least the high-concentration impurity layer, thereby forming a photonic crystal portion that transmits light of the prescribed wavelength band as a result of having a periodic refractive index distribution in a main-plane direction of the semiconductor substrate.

2. The light-receiving element according to claim 1, wherein the plurality of low-refractive-index regions is formed so as to pass through the high-concentration impurity layer to reach the light-absorbing layer so that the photonic crystal portion reaches the light-absorbing layer.

3. The light-receiving element according to claim 1 or 2, wherein the plurality of low-refractive-index regions is a plurality of cavities provided at least in the high-concentration impurity layer.

4. The light-receiving element according to claim 1 or 2, wherein the plurality of low-refractive-index regions has a structure in which a plurality of recesses provided at least in the high-concentration impurity layer is filled with a material having a lower refractive index than the high-concentration impurity layer with respect to light of the prescribed wavelength band.

5. The light-receiving element according to claim 4, wherein an anti-reflective film composed from the material filling the plurality of recesses is formed on the high-concentration impurity layer.

6. The light-receiving element according to claim 1 or 2, wherein the low-refractive-index regions are regions of the same conductivity type as the high-concentration region that have a lower impurity concentration than the high-concentration region.

7. The light-receiving element according to any one of claims 1–6, wherein each of the plurality of low-refractive-index regions has a circular planar shape.

8. The light-receiving element according to any one of claims 1–7, wherein:

the light-absorbing layer includes, as the low-concentration impurity layer, a first-conductivity-type low-concentration impurity layer and a second-conductivity-type low-concentration impurity layer formed thereon; and

the high-concentration impurity layer is of the second conductivity type.

9. The light-receiving element according to any one of claims 1–8, wherein the plurality of low-refractive-index regions has a planar shape of dimensions corresponding to a wavelength of light in the prescribed wavelength band.

10. The light-receiving element according to any one of claims 1–9, wherein:

when the refractive index of the high-concentration impurity layer with respect to light of the prescribed wavelength band is n_1 , the refractive index of the plurality of low-refractive-index regions with respect to light of the prescribed wavelength band is n_2 , the central wavelength of the prescribed wavelength band is λ , and the spacing between the plurality of low-refractive-index regions is D , the following equation holds:

$$D = (\lambda/2n_1) + (\lambda/2n_2).$$

DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

TECHNICAL FIELD

[0001]

The present invention relates to a light-receiving element used in an optical pickup device or the like.

BACKGROUND ART

[0002]

At present, light-receiving elements for optical pickup used in optical disc devices, as represented by CD-R (Compact Disc-Recordable) drives, DVD (Digital Versatile Disc) drives, and the like, are mainly made up of a photodiode, which is for receiving laser light that has been reflected by an optical disc and returned therefrom, and a signal processing circuit region, which is for processing an electrical signal generated by the light-receiving element, such as a photodiode, on the basis of the received laser light.

[0003]

In recent years, there has been a demand for higher-speed operation and increased storage capacity in optical disc devices. For this reason, even in DVD optical pickup systems, the wavelengths of the semiconductor lasers that serve as light sources have become increasingly shorter for the purpose of increasing the storage capacity of optical discs. In other words, while red semiconductor lasers that radiate light at a wavelength of 650 nm were used in the past, a transition is underway to systems employing blue semiconductor lasers that radiate light at a wavelength of 405 nm.

[0004]

As the light source shifts to shorter wavelengths, the light-receiving element also requires characteristics suited to blue wavelengths. The shorter the wavelength of the received light, the greater the absorption coefficient of the light by silicon becomes. For this reason, the shorter the wavelength of light irradiated by the photodiode, the nearer to the surface of the semiconductor layer the light is absorbed and photocarriers are generated.

[0005]

The depth to which the light penetrates the semiconductor layer—for example, the distance from the surface of the semiconductor to the location at which the optical intensity of the laser light is attenuated 60% by optical absorption—is approximately 4.0 μm in the case of conventional red light (wavelength: 650 nm) as opposed to approximately 0.3 μm in the case of blue light (wavelength: 405 nm). That is, most of the blue light is absorbed in shallower regions of the semiconductor.

[0006]

The higher the impurity concentration in the impurity region of the semiconductor layer, the shorter the lifetimes of photocarriers become. That is, even if photocarriers are generated by optical absorption, they are eliminated through recombination and are less likely to contribute to the photocurrent extracted as an external current. As a result, sensitivity to incoming light decreases. As discussed above, the shorter the wavelength of incoming light, the nearer to the surface of the semiconductor substrate it is absorbed; thus, reductions in sensitivity due to a high impurity concentration in the vicinity of the surface become more prominent the shorter the wavelength of the incoming light is.

[0007]

In contrast, the lower the impurity concentration near the surface of the semiconductor substrate, the greater parasitic resistance becomes. This is known to be a cause of reductions in the response speed of light-receiving elements.

[0008]

In this manner, the requirements for realizing improvements in sensitivity and the requirements for realizing improvements in response speed are diametrically opposed in terms of the impurity concentration in the semiconductor layer of a light-receiving element.

[0009]

As an example of a technique for managing this, light-receiving elements and the like in which low-concentration regions and high-concentration regions are formed periodically at a constant spacing in a lattice pattern have been proposed (for example, see Patent Document 1).

Patent Document 1

Japanese Laid-open Patent Publication 2003-158251

DISCLOSURE OF THE INVENTION

PROBLEMS TO BE SOLVED BY THE INVENTION

[0010]

However, in the light-receiving element of Patent Document 1, some of the light enters the high-concentration regions, and such light is absorbed into regions having low light reception sensitivity. For this reason, a decrease in sensitivity still occurs when considering the light-receiving element as a whole. Conversely, light irradiating the low-concentration regions ends up being absorbed in regions of high light reception sensitivity; however, because the low-concentration regions are present on the surface of the substrate, parasitic resistance on the surface of the substrate increases, thereby causing lags in response speed. Thus, a balance between high sensitivity and high response speed has not been sufficiently realized.

[0011]

10 Accordingly, the present invention was conceived to solve such a problem and has an object of providing a light-receiving element that satisfies the characteristics of both high sensitivity, especially to blue lasers, and high response speed.

MEANS FOR SOLVING THE PROBLEMS

[0012]

20 To achieve the aforementioned object, the inventors of the present application conceived of forming a high-concentration impurity layer, to which a high impurity concentration has been imparted in order to reduce parasitic resistance, on a light-absorbing layer, to which a low impurity concentration has been imparted to prevent the elimination of photocarriers through recombination, and, furthermore, curtailing the absorption of incoming light in the high-concentration impurity layer by forming, in the high-concentration impurity layer, a photonic crystal that transmits incoming light.

[0013]

30 Specifically, the light-receiving element of the present invention comprises: a semiconductor substrate; a light-absorbing layer that is formed on the semiconductor substrate, includes a low-concentration impurity layer, and absorbs light of a prescribed wavelength band; and a high-concentration impurity layer that is formed on the light-absorbing layer and has a higher impurity concentration than the low-concentration impurity layer; wherein a plurality of low-refractive-index regions having a lower refractive index than the high-concentration impurity layer with respect to light of the prescribed wavelength band is arrayed with a constant spacing in at least the high-concentration impurity layer, thereby forming a photonic crystal portion that transmits light of the prescribed wavelength band as a result of having a periodic refractive index distribution in a principal-plane direction of the semiconductor substrate.

[0014]

According to the light-receiving element of the present invention, a photonic crystal that transmits light of a prescribed wavelength band is formed in the high-concentration impurity layer formed on the light-absorbing layer. For this reason, light of a prescribed wavelength incident upon the light-receiving element is subjected to Bragg reflection due to the periodic refractive index distribution in the photonic crystal portion of the high-concentration impurity layer, and thus is not absorbed. That is, the incoming light is transmitted through the photonic crystal portion without being attenuated, with the result that more light reaches the light-absorbing layer.

[0015]

40 Light reaching the light-absorbing layer is absorbed, thereby generating photocarriers (electrons and electron holes). At this time, there is little elimination of photocarriers through recombination owing to the impurity concentration being low in the low-concentration impurity layer, resulting in high sensitivity (the impurity concentration of the low-concentration impurity layer is set so as to achieve this). Furthermore, because the high-concentration impurity layer, which has low parasitic resistance owing to the impurity concentration being high in the vicinity of the surface of the light-receiving element, has been provided, response speed is high (the impurity concentration of the high-concentration impurity layer is set to an impurity concentration that is higher than that of the low-concentration impurity layer so as to achieve this). In this manner, the light-receiving element of the present invention realizes a balance between high sensitivity and high response speed.

50 [0016]

It is preferable that the plurality of low-refractive-index regions be formed so as to pass through the high-concentration impurity layer to reach the light-absorbing layer so that the photonic crystal portion reaches the light-absorbing layer.

[0017]

Through this, light entering the light-receiving element is capable of reaching the light-absorbing layer without passing through the portions of the high-concentration impurity layer in which the photonic crystal portion has not been formed. Further improvement in response speed and optical sensitivity is thereby realized.

[0018]

First, the further improvement in response speed will be explained.

60 [0019]

When electrons and electron holes, which are photocarriers, are generated by the incidence of light, the electrons migrate to the cathode and the electron holes migrate to the anode, thereby contributing to the photocurrent. When electrons and electron holes are generated in the light-absorbing layer, these electrons and electron holes are rapidly transported out of the light-absorbing layer through electric field drift, and subsequently migrate to the cathode and anode, respectively.

[0020]

In contrast, when photocarriers are generated in the high-concentration impurity layer provided on the light-absorbing layer, either electrons or electron holes migrate to the light-absorbing layer through diffusion and are then transported to the cathode or anode in the same manner as described above. At this time, the migration of photocarriers through diffusion in the high-concentration impurity layer is significantly slower than the migration thereof through electric field drift in the light-absorbing layer. As a result, the time for both electrons and electron holes that are photocarriers generated as pairs in the high-concentration impurity layer to reach the cathode or anode is longer than in the case of photocarriers generated in the light-absorbing layer. That is, photocarriers generated in the high-concentration impurity layer are a cause of reductions in response speed.

[0021]

Accordingly, by providing the photonic crystal portion in such a way that it reaches the light-absorbing layer, as described above, it is possible to prevent the generation of photocarriers in the high-concentration impurity layer and improve response speed.

[0022]

Next, the further improvement in optical sensitivity is due to the fact that absorption in the high-concentration impurity layer, in which photocarriers tend to be eliminated by recombination, can be avoided, thereby preventing reductions in sensitivity. In this manner, further improvement in response speed and optical sensitivity is realized.

[0023]

In addition, the plurality of low-refractive-index regions in the light-receiving element of the present invention is preferably a plurality of cavities provided at least in the high-concentration impurity layer.

[0024]

The refractive index of the cavities is lower than that of the high-concentration impurity layer, which is formed from silicon or the like. Therefore, by disposing the plurality of cavities in the high-concentration impurity layer, it is possible to realize a periodic refractive index distribution, thereby creating a photonic crystal portion.

[0025]

In addition, the plurality of low-refractive-index regions preferably has a structure in which a plurality of recesses provided at least in the high-concentration impurity layer is filled with a material having a lower refractive index than the high-concentration impurity layer with respect to light of the prescribed wavelength band.

[0026]

By doing this, it is possible to realize a periodic refractive index distribution through the difference in refractive index between the material that constitutes the high-concentration impurity layer and the material having the lower refractive index, thereby creating a photonic crystal portion. At this time, any refractive index difference can be produced by selecting a material of the desired refractive index and filling the recesses therewith, thereby making it possible to more easily obtain a photonic crystal portion that transmits light of the prescribed wavelength band.

[0027]

In addition, in such a structure, an anti-reflective film composed from the material filling the plurality of recesses is preferably formed on the high-concentration impurity layer.

[0028]

By doing this, it is possible, in addition to the aforementioned effect of providing a low-refractive-index region having a structure in which the recesses are filled with a material having a low refractive index, to improve the sensitivity of the light-receiving element by curtailing the reflection of light on the surface of the light-receiving element with the anti-reflective film, thereby increasing the amount of incoming light. In particular, it is possible to simultaneously realize both anti-reflective characteristics with respect to long-wavelength light and the optical transmissiveness of the photonic crystal portion with respect to short-wavelength light, thereby making it possible to strike a balance between high sensitivity and high response speed over a wide wavelength range.

[0029]

In addition, the low-refractive-index regions are preferably regions of the same conductivity type as the high-concentration region that have a lower impurity concentration than the high-concentration region.

[0030]

That is, it is preferable to take advantage of the fact that a difference in refractive index arises owing to the difference in concentration of impurities of the same conductivity type to realize a periodic refractive index distribution, thereby creating a photonic crystal portion. Here, it is possible to set the difference in refractive indices by setting a difference in impurity concentrations, whereby it is possible to create a photonic crystal portion that transmits light of a desired wavelength band.

[0031]

Each of the plurality of low-refractive-index regions preferably has a circular planar shape.

[0032]

10 Using circular low-refractive-index regions results in high reproducibility in the formation of uniform patterns as well as high symmetry. This is desirable in order to realize a photonic crystal portion that transmits light of the desired wavelength band.

[0033]

In addition, the light-absorbing layer preferably includes, as the low-concentration impurity layer, a first-conductivity-type low-concentration impurity layer and a second-conductivity-type low-concentration impurity layer formed thereon; and the high-concentration impurity layer is preferably of the second conductivity type.

[0034]

20 By doing this, light absorption can be effected in a depletion layer formed at the interface between the first-conductivity-type low-concentration impurity layer and the second-conductivity-type low-concentration impurity layer.

[0035]

In addition, the plurality of low-refractive-index regions preferably has a planar shape of dimensions corresponding to a wavelength of light in the prescribed wavelength band. Furthermore, it is preferable that, when the refractive index of the high-concentration impurity layer with respect to light of the prescribed wavelength band is n_1 , the refractive index of the plurality of low-refractive-index regions with respect to light of the prescribed wavelength band is n_2 , the central wavelength of the prescribed wavelength band is λ , and the spacing between the plurality of low-refractive-index regions is D , the following equation holds: $D = (\lambda/2n_1) + (\lambda/2n_2)$.

[0036]

30 By doing this, a photonic crystal portion that transmits light of the prescribed wavelength band is reliably formed by the high-concentration impurity layer and the low-refractive-index regions.

EFFECTS OF THE INVENTION

[0037]

40 According to the light-receiving element according to the present invention, as described above, a photonic crystal portion that transmits light of a prescribed wavelength band is formed in the high-concentration impurity layer formed in the vicinity of the surface of the light-receiving element, with the result that incoming light reaches the light-absorbing layer, which includes the low-concentration impurity layer under the high-concentration impurity layer, without being absorbed in the high-concentration impurity layer. Through this, both the recombination of carriers in the high-concentration impurity layer and parasitic resistance in the vicinity of the surface of the light-receiving element are curtailed, resulting in a light-receiving element that realizes a balance between high sensitivity and high response speed. In particular, it is possible to provide a high-performance light-receiving element suitable for short-wavelength light, such as a blue laser, which is easily absorbed in the vicinity of the surface of the element.

MODES FOR CARRYING OUT THE INVENTION

[0038]

Light-receiving elements according to various embodiments of the present invention will be described below with reference to the drawings. It is noted that similar constituent elements appearing across multiple drawings will be assigned the same reference numerals, and detailed descriptions thereof may thus be omitted.

[0039]

50 (First Embodiment)

FIG. 1(a) and FIG. 1(b) are diagrams schematically illustrating the essential parts of a light-receiving element according to a first embodiment and are a plan view and a cross-sectional view, in that order. It is noted that FIG. 1(a) is a cross section along line Ia-Ia' in FIG. 1(b).

[0040]

As shown in FIG. 1(a), a light-receiving element 20 according to the present embodiment is configured as a PIN photodiode. Specifically, the light-receiving element 20 is formed using a high-concentration P⁺-type silicon substrate 1, and a low-concentration P-type silicon layer 2 (film thickness: 15 μm), a low-concentration N-type silicon layer 3 (film thickness: 5 μm), a high-concentration N⁺-type silicon layer 4, and a silicon oxide

film 5 are layered on the high-concentration P+-type silicon substrate 1 in that order from the bottom. In addition, a cathode electrode wire 7 is provided so as to pass through the silicon oxide film 5 to reach the high-concentration N+-type silicon layer 4, and an anode electrode wire 8 is provided on the rear surface of the high-concentration P+-type silicon substrate 1 (the surface on the opposite side from the surface on which the low-concentration P-type silicon layer 2, etc., are formed).

[0041]

The interface between the N-type layer and the P-type layer—i.e., the interface between the low-concentration P-type silicon layer 2 and the low-concentration N-type silicon layer 3—forms a P-N junction; thus, a depletion layer is formed in this portion. The depletion layer mainly functions as a light-absorbing layer.

10 [0042]

In addition, a plurality of cavities 6, each of which passes through the high-concentration N+-type silicon layer 4 (and the silicon oxide film 5) to reach the low-concentration N-type silicon layer 3, is formed. The cavities 6 may be formed deeper than the lower surface of the high-concentration N+-type silicon layer. The light-receiving element 20 in FIG. 1(a) is such an example, in which the thickness of the silicon oxide film 5 is approximately 100 nm, whereas the depth of the cavities 6 is approximately 500 nm.

[0043]

As shown in FIG. 1(b), the cavities 6 have a circular planar shape and are regularly provided equispaced. It is noted that, in FIG. 1(b), the silicon oxide film 5 is omitted from the illustration.

[0044]

20 The refractive index of the cavities 6 (1.0) is lower than the refractive index of the high-concentration N+-type silicon layer 4 (5.6), and the plurality of cavities 6, each of which has the same diameter A1, is provided equispaced. For this reason, a periodic refractive index distribution in the principal-plane direction of the high-concentration P+-type silicon substrate 1 is produced by the high-concentration N+-type silicon layer 4 and the plurality of cavities 6, thereby forming a photonic crystal portion 21.

[0045]

30 The light-receiving element 20 according to the present embodiment is for receiving a blue laser (wavelength: 405 nm). Accordingly, the diameter A1 of the cavities 6 is 400 nm, approximately the same as the wavelength of the incoming light (laser light). In addition, the spacing D1 between the cavities 6 is 240 nm, and the cavities 6 are independently arrayed. In this manner, the plurality of low-refractive-index cavities 6 is disposed as a pattern of comparable size to the wavelength of the incoming light so as to effect functioning as a photonic crystal.

[0046]

40 In the thus-configured light-receiving element 20 according to the present embodiment, when laser light reflected by, for example, an optical disc is irradiated onto the surface of the light-receiving element 20, the light is subjected to Bragg reflection at the photonic crystal portion 21 owing to the periodic refractive index distribution in the principal-plane direction (the direction intersecting the direction of incidence). As a result, the laser light is not absorbed within the photonic crystal portion 21, which has an optical band gap in the optical wavelength range of the laser light, and is transmitted through the cavities 6 or the N+-type silicon layer 4 that constitute the photonic crystal. As a result, the laser light reaches the low-concentration N-type silicon layer 3, which is formed in a region deeper than the high-concentration N+-type silicon layer 4 and has a low impurity concentration, without attenuation.

[0047]

50 Thereafter, blue light having a large light absorption coefficient is absorbed in the low-concentration N-type silicon layer 3 and the low-concentration P-type silicon layer 2 and is converted into photocarriers (electrons and electron holes) in the depletion layer at the interface therebetween. The electrons among the generated photocarriers are rapidly drawn, via electric field drift, into the high-concentration N+-type silicon layer 4 on the surface of the light-receiving element. Because the cavities 6 are independent of (not connected to) each other, as shown in FIG. 1(b), the high-concentration N+-type silicon layer 4 is continuous in the principal-plane direction of the light-receiving element 20, and the drawn-in electrons can easily pass through the interior of the high-concentration N+-type silicon layer 4 to reach the cathode electrode wire 7. It is noted that the electron holes among the generated photocarriers migrate to the anode electrode wire 8 side and contribute to a photocurrent.

[0048]

According to the light-receiving element 20 of the present embodiment, by forming the photonic crystal portion 21 in this manner, light of a wavelength corresponding to the optical band gap is not absorbed by the high-concentration N+-type silicon layer 4 and reaches the low-concentration N-type silicon layer 3 and the low-concentration P-type silicon layer 2 therebeneath. That is, it is possible to avoid the absorption of light in the high-concentration impurity layer, in which there is significant recombination that causes reductions in

sensitivity, and to cause light to be absorbed in the low-concentration impurity layer.

[0049]

Furthermore, the low-parasitic-resistance high-concentration N⁺-type silicon layer 4 is provided in the vicinity of the surface of the light-receiving element 20, and generated photocarriers diffuse through the high-concentration N⁺-type silicon layer 4, thereby improving response speed.

[0050]

Accordingly, the light-receiving element 20 according to the present embodiment realizes a balance between high sensitivity and high response speed and is a light-receiving element suitable for a blue laser (wavelength: 405 nm), which is light of a short wavelength at which absorption coefficient with respect to silicon becomes large.

[0051]

As a specific example, a light-receiving element 20 was obtained such that the light-receiving element 20 exhibited a sensitivity of 0.3 A/W and a frequency characteristic of 220 MHz at -1 dB with respect to an incoming light wavelength $\lambda = 405$ nm. With a conventional light-receiving element, for example, sensitivity was 0.26 A/W and the frequency characteristic was -1 dB at 200 MHz with respect to the same incoming light wavelength $\lambda = 405$ nm. In this manner, the light-receiving element 20 according to the present embodiment reliably realizes a balance between high sensitivity and high response speed.

[0052]

It is noted that an example of the present embodiment in which the diameter A1 of the cavities 6 is 400 nm, which is approximately equivalent to the wavelength of the incoming light (laser light wavelength: 405 nm), is a preferred configuration for the pattern size of the low-refractive-index regions. However, taking into account the fact that laser light has a wavelength distribution, the diameter of the cavities 6 should be set to dimensions of approximately ± 50 nm of the central wavelength of the incoming light. In this manner, it is also possible to create a configuration that is not limited to incoming light of a single wavelength, such as 405 nm, but takes the wavelength distribution of incoming light into account, and thus accounts for variation and is suitable for light of various wavelengths.

[0053]

In addition, although an example in which the high-concentration P⁺-type silicon substrate 1 is used has been described in the present embodiment, the present invention is not limited thereto, and any of the various components can also be configured to have the opposite conductivity type. Furthermore, although an example in which the anode electrode wire 8 is formed on the rear surface of the high-concentration P⁺-type silicon substrate 1 has been described, the present invention is not limited thereto. For example, a configuration is also possible in which an insulating isolation layer is provided between the anode and the cathode, a contact layer connected to the high-concentration P⁺-type silicon substrate 1 is formed from the front-surface side (the side of the light-receiving element 20 on which the silicon oxide film 5 is formed), and the anode electrode is led to the front surface.

[0054]

Next, a method of manufacturing the light-receiving element 20 according to the present embodiment will be described with reference to the drawings. FIG. 2(a) through FIG. 2(f) are cross-sectional views for explaining the method of manufacturing the light-receiving element 20, especially the process of forming the light-receiving region.

[0055]

First, as shown in FIG. 2(a), the low-concentration P-type silicon layer 2, which has a specific resistance of approximately 100 $\Omega \cdot \text{cm}$ and a thickness of approximately 20 μm , is formed on the high-concentration P⁺-type silicon substrate 1, which has an impurity concentration of approximately $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, via an epitaxial growth method. Next, the same epitaxial growth method is used to form the low-concentration N-type silicon layer 3, which has a specific resistance of approximately 100 $\Omega \cdot \text{cm}$ and a film thickness of approximately 10 μm , on the low-concentration P-type silicon layer 2. It is noted that the impurity concentrations of the low-concentration P-type silicon layer 2 and the low-concentration N-type silicon layer 3 are set so as to avoid the recombination-induced loss of photocarriers generated by the depletion of the two layers.

[0056]

Next, as shown in FIG. 2(b), the silicon oxide film 5 (e.g., a thermal oxide film) is formed on the low-concentration N-type silicon layer 3.

[0057]

Thereafter, as shown in FIG. 2(c), impurity implantation is performed on the low-concentration N-type silicon layer 3 over the required range using a masking process. The high-concentration N⁺-type silicon layer 4 is thereby formed on the upper portion of the low-concentration N-type silicon layer 3. In this case, As (arsenic), for example, is used as the impurity, and doping conditions of, for example, an ion implantation energy of 20

keV and an ion implantation dose of $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ are used. Such doping conditions (the impurity concentration of the high-concentration N+-type silicon layer 4) are set so that the parasitic resistance of the high-concentration N+-type silicon layer 4 is sufficiently low in order to achieve high response speed on the part of the light-receiving element.

[0058]

Next, as shown in FIG. 2(d), a contact hole is provided in the silicon oxide film 5 formed on the high-concentration N+-type silicon layer 4. The cathode electrode wire 7 is formed so as to connect to the high-concentration N+-type silicon layer 4 via the contact hole.

[0059]

10 In addition, as shown in FIG. 2(e), the anode electrode wire 8 is formed on the rear surface of the high-concentration P+-type silicon substrate 1.

[0060]

Next, the process shown in FIG. 2(f) is performed. That is, after the formation of the anode electrode wire 8 and the cathode electrode wire 7, a mask of a prescribed pattern is formed using a lithographic technique and the plurality of cavities 6 is formed via anisotropic dry etching so as to pass through the high-concentration N+-type silicon layer 4.

[0061]

20 Here, the cavities 6 are arranged and formed in the high-concentration N+-type silicon layer 4 without contacting each other, as shown in FIG. 1(b). In addition, each of the cavities 6 has a circular planar shape having a diameter A1 of 400 nm, substantially the same as the wavelength of the incoming light. The spacing D1 between the cavities 6 is 240 nm.

[0062]

In addition, the depth of the cavities 6 is approximately 500 nm from the surface of the silicon oxide film 5. This means that, given that the depth of the high-concentration N+-type silicon layer 4 is approximately 400 nm, the cavities 6 are formed deeper than this, as shown in FIG. 2(f). As will be described later, the photonic crystal portion 21 preferably reaches the low-concentration N-type silicon layer 3; in addition, there is no major problem with the cavities 6 being formed deeper than the upper surface of the low-concentration N-type silicon layer 3. For this reason, from the perspective of fabrication precision, etc., the cavities 6 should be formed deeper than the upper surface of the low-concentration N-type silicon layer 3.

30 [0063]

By forming the cavities 6, the relatively low-refractive-index cavities 6 are regularly arrayed in the relatively high-refractive-index high-concentration N+-type silicon layer 4 in a pattern of a size comparable to the wavelength of the incoming light. The photonic crystal portion 21 is thereby formed, and, as previously explained, the laser light passes through the photonic crystal portion 21 unabsorbed, reaches the low-concentration N-type silicon layer 3, which has a low impurity concentration, and is then absorbed. In this manner, it is possible to manufacture a light-receiving element 20 that realizes a balance between high sensitivity and high response speed with respect to the reception of blue laser light.

[0064]

40 It is noted that, here, the cavities 6 were formed in a state in which the silicon oxide film 5 is formed on the high-concentration N+-type silicon layer 4. However, another film, such as an SiN film or the like, layered on the silicon oxide film 5 may be formed, or yet another film may be formed.

[0065]

In addition, in the present embodiment, the cavities 6 all pass through the high-concentration N+-type silicon layer 4 to reach the low-concentration N-type silicon layer 3, whereby the photonic crystal portion 21 also reaches the low-concentration N-type silicon layer 3. This is a preferred configuration for improving the sensitivity and improving the response speed of the light-receiving element. However, it is also possible to create a configuration in which the cavities 6 do not pass through the high-concentration N+-type silicon layer 4, i.e., are formed to fit within the high-concentration N+-type silicon layer 4.

[0066]

50 In this situation, the photonic crystal portion is formed in the range in which the cavities 6 are formed, and the absorption of incoming light is prevented in the region of the photonic crystal portion. Photocarriers are reduced through recombination in the portion of the high-concentration N+-type silicon layer 4 outside the range of the photonic crystal portion. In addition, photocarriers that are not eliminated by recombination and

contribute to the photocurrent are also a cause of reductions in response speed.

[0067]

As stated previously, the photocarriers generated in the depletion layer arising at the interface between the low-concentration N-type silicon layer 3 and the low-concentration P-type silicon layer 2 rapidly migrate via electric field drift. At this time, the electron holes in the photocarriers migrate to the anode electrode wire 8 side. In contrast, if photocarriers are generated in the portion of the high-concentration N⁺-type silicon layer 4 outside the range of the photonic crystal portion 21, then the electron holes therein must migrate to the depletion layer via diffusion. The migration speed at this time is significantly slower than that of migration via electric field drift. Therefore, the time to reach the anode electrode wire 8 is longer compared to electron holes generated in the depletion layer, which is a cause of reductions in response speed.

[0068]

For reasons such as these, the effect of improving sensitivity is exhibited even with a structure in which the cavities 6 do not reach the low-concentration N-type silicon layer 3; however, a structure in which the cavities 6 reach the low-concentration N-type silicon layer 3, as shown in FIG. 1(a), is more preferable.

[0069]

(Second Embodiment)

Next, a light-receiving element 20a according to a second embodiment of the present invention will be described with reference to the drawings. FIG. 3(a) through FIG. 3(f) are cross-sectional views showing the process of manufacturing the light-receiving element 20a, especially the light-receiving region thereof.

[0070]

A cross-section of the light-receiving element 20a according to the present embodiment is shown in FIG. 3(f). This may be thought of as a configuration for the light-receiving element 20 according to the first embodiment shown in FIG. 1(a), in which the cavities 6 are a plurality of low-refractive-index portions 9a filled with a low-refractive-index material such as SOG (Spin on Glass). Accordingly, the low-refractive-index portions 9a have a circular planar shape similar to that shown in FIG. 1(b) and are arrayed independently of each other and equispaced. Note that "low-refractive-index material" refers to a material having a lower refractive index than the high-concentration N⁺-type silicon layer 4 with respect to incoming light.

[0071]

However, although the diameter A2 of the pattern of the low-refractive-index portions 9a is 400 nm (comparable to the wavelength of the contemplated incoming light, i.e., 405 nm), the same as that of the cavities 6 of the light-receiving element 20, the spacing D1 between the cavities 6 of the light-receiving element 20 is 240 nm, whereas the spacing D2 between the low-refractive-index portions 9a is 180 nm.

[0072]

In the light-receiving element 20a as well, the high-concentration N⁺-type silicon layer 4 and the low-refractive-index portions 9a regularly disposed therein give rise to a periodic refractive index distribution in a direction intersecting the direction of incidence of the laser light, thereby forming the photonic crystal portion 21. For this reason, as in the case of the first embodiment, incoming light is subjected to Bragg reflection in the photonic crystal portion 21, which has an optical band gap in the optical wavelength range of the incoming light, and transmitted therethrough unabsorbed to reach the low-concentration N-type silicon layer 3. Thereafter, the incoming light is absorbed in the depletion layer formed by the interface between the low-concentration N-type silicon layer 3 and the low-concentration P-type silicon layer 2, thereby generating photocarriers.

[0073]

As a result, improvement in the sensitivity of the light-receiving element 20a is realized and, as a result of the low parasitic resistance resulting from the high-concentration N⁺-type silicon layer 4 formed on the low-concentration N-type silicon layer 3, response speed is improved, as in the case of the first embodiment.

[0074]

It is noted that the low-refractive-index material that fills the cavities 6 is not limited to being SOG and may be selected according to the wavelength of the incoming light and the spacing of the periodic pattern. Conversely, the pattern spacing of the photonic crystal portion 21 can be set by using a material having a fixed refractive index. For example, a material should be used that has a lower refractive index, with respect to light of wavelength 405 nm, than the refractive index $n = 5.42$ of the high-concentration N⁺-type silicon layer 4 and that transmits light of wavelength 405 nm. By using such a material, the photonic crystal portion 21 can be

formed to create an optical band gap.

[0075]

In photonic crystals, the refractive index of the material and the pattern spacing have the following relationship. That is, when the wavelength of the incoming light (or, if the wavelength distribution of the incoming light is being considered, the central wavelength thereof) is λ , the refractive indices of the high-refractive-index material and the low-refractive-index material with respect to the incoming light are n_1 and n_2 , in that order, and the periodic spacing (here, the spacing between low-refractive-index portions 9a) is D, if the relationship in equation (1) below is satisfied,

$$D = (\lambda/2n_1) + (\lambda/2n_1)(n_1 > n_2) \dots (1)$$

10 then a photonic crystal will be realized and an optical band gap can be produced. In the case of the present embodiment, the refractive index of the SOG is approximately 1.42, and, based on equation (1), the spacing D2 is 180 nm, as indicated previously.

[0076]

It is noted that, based on the relationship in this equation (1), the lower the refractive index of the material used, the larger the periodic spacing D can be made. Given that pattern formation is easier with a large periodic spacing D, a material having a lower refractive index is preferably used.

[0077]

20 The light-receiving element 20a according to the present embodiment can be manufactured, for example, in the following manner. First, the structure shown in FIG. 3(a) is similar to the structure shown in FIG. 2(c) in the first embodiment and is formed by the process shown in FIG. 2(a) and FIG. 2(b).

[0078]

Next, as shown in FIG. 3(b), the plurality of cavities 6, which pass through the low-concentration N-type silicon layer 3, is formed. To this end, a masking process was performed via lithography and an anisotropic dry etching process was performed. The planar shape and arrangement are similar to those shown in FIG. 1(b), except that the diameter A2 of the cavities 6 is 400 nm and the spacing D2 therebetween is 180 nm, as stated above.

[0079]

Next, as shown in FIG. 3(c), an SOG layer 9, which fills the cavities 6 and covers the silicon oxide film 5, is formed via a spin-coating method.

30 [0080]

Next, as shown in FIG. 3(d), the portion of the SOG that protrudes from the cavities 6 is removed using a CMP (Chemical Mechanical Polishing) method. The low-refractive-index portions 9a, in which the cavities 6 are filled with SOG, are thereby formed.

[0081]

Next, as shown in FIG. 3(e), a contact hole that passes through the silicon oxide film 5 is formed and the cathode electrode wire 7, which connects to the high-concentration N⁺-type silicon layer 4 via the contact hole, is formed. Thereafter, as shown in FIG. 3(f), the anode electrode wire 8 is formed on the rear surface of the high-concentration P⁺-type silicon substrate 1.

[0082]

40 (Third Embodiment)

A light-receiving element 20b according to a third embodiment of the present invention will be described below with reference to the drawings. FIG. 4(a) through FIG. 4(f) are cross-sectional views showing the process of manufacturing the light-receiving element 20b, especially the light-receiving region thereof.

[0083]

50 A cross section of the light-receiving element 20b according to the present embodiment is shown in FIG. 4(f). This can be thought of as a structure for the light-receiving element 20 according to the first embodiment shown in FIG. 1(a), wherein the cavities 6 are filled with SiN to form low-refractive-index portions 10a and an SiN film 10b is formed from the same SiN. However, while the reception of light of wavelength 405 nm is contemplated here as well and the diameter A3 of the pattern of the low-refractive-index portions 10a is thus 400 nm, the same as in the light-receiving element 20, the spacing D3 between the low-refractive-index portions 10a is 140 nm. Such a value for the spacing D3 is determined using equation (1) above because the refractive index of SiN is 2.00.

[0084]

Because SiN has a lower refractive index than the high-concentration N⁺-type silicon layer 4, the low-refractive-index portions 10a constituted by the cavities 6 filled with the SiN are regularly arranged in a pattern of a size comparable to the wavelength of the incoming light, thereby producing a periodic refractive index distribution in a direction intersecting the incoming light. The photonic crystal portion 21, which has an optical band gap in the optical wavelength range of the incoming light, is thereby formed, and incoming light is subjected to Bragg reflection and thus transmitted unabsorbed to reach the low-concentration N-type silicon layer 3. Thereafter, the generation and migration of photocarriers occur as also described in the previous embodiment, and the light-receiving element 20b realizes both improved sensitivity and improved response speed.

10 [0085]

Furthermore, in the light-receiving element 20b according to the present embodiment, the SiN film 10b is formed from the same SiN as in the low-refractive-index portions 10a so as to cover the silicon oxide film 5 and the low-refractive-index portions 10a. The layered film constituted by the SiN film 10b and the silicon oxide film 5 functions as an anti-reflective film for red to infrared light. For this reason, the light-receiving element 20b has excellent transmissiveness of short-wavelength light because of the photonic crystal portion 21 and has excellent anti-reflective properties with respect to long-wavelength light.

[0086]

20 Accordingly, the light-receiving element 20b is capable of efficiently receiving a wide range of wavelengths, ranging from short wavelengths such as blue light to long wavelengths such as infrared light, and exhibits high-performance characteristics that realizes a balance between high sensitivity and high response speed.

[0087]

Because the low-refractive-index portions 10a formed inside the high-concentration N⁺-type silicon layer 4 are independent of each other, the high-concentration N⁺-type silicon layer 4 is continuous in the principal-plane direction of the light-receiving element. Accordingly, although the low-refractive-index portions 10a can be considered to be connected to each other by the SiN film 10b, which is formed from the same material, a path for carriers to migrate through the interior of the high-concentration N⁺-type silicon layer 4 in the principal-plane direction is nonetheless secured.

[0088]

30 The light-receiving element 20a according to the present embodiment can be manufactured, for example, in the following manner. First, the structure shown in FIG. 4(a) is similar to the structure shown in FIG. 2(c) in the first embodiment and is formed by the process shown in FIG. 2(a) and FIG. 2(b).

[0089]

Next, as shown in FIG. 4(b), the plurality of cavities 6, which pass through the low-concentration N-type silicon layer 3, is formed. To this end, a masking process was performed via lithography and an anisotropic dry etching process was performed. The planar shape and arrangement are similar to those shown in FIG. 1(b), except that the diameter A3 of the cavities 6 is 400 nm and the spacing D3 therebetween is 140 nm, as stated above.

[0090]

40 Next, as shown in FIG. 4(c), an SiN film 10, which fills the cavities 6 and covers the silicon oxide film 5, is formed via a plasma CVD method or the like. The low-refractive-index portions 10a, in which the cavities 6 are filled with SiN, are thereby formed. Thereafter, as shown in FIG. 4(d), the SiN film 10 is polished using a CMP method to leave the SiN film 10b at a desired thickness. As a result, the layered film constituted by the SiN film 10b and the silicon oxide film 5 functions as an anti-reflective film.

[0091]

By forming the low-refractive-index portions 10a and the SiN film 10b, which is for obtaining the anti-reflective film, from the same material in this manner, it is possible to simplify the process of manufacturing the light-receiving element 20b.

[0092]

50 Thereafter, as shown in FIG. 4(e), the cathode electrode wire 7, which passes through the SiN film 10b and the silicon oxide film 5 and connects to the high-concentration N⁺-type silicon layer 4, is formed. Furthermore, as shown in FIG. 4(f), the anode electrode wire 8 is formed on the rear surface of the high-concentration P⁺-type silicon substrate 1.

[0093]

Through the process described above, the light-receiving element 20b according to the present embodiment is manufactured. It is noted that, although the SiN film 10b, which constitutes the low-refractive-index portions 10a and is part of the anti-reflective film, was formed using SiN as a material, it is not limited thereto.

[0094]

(Fourth Embodiment)

Next, a light-receiving element 20c according to a fourth embodiment of the present invention will be described with reference to the drawings. FIG. 5(a) and FIG. 5(b) are cross-sectional views showing the process of manufacturing the light-receiving element 20c, especially the light-receiving region thereof. In addition, a plan view of the light-receiving element 20c is shown in FIG. 5(c).

[0095]

10 A cross section of the light-receiving element 20c according to the present embodiment is shown in FIG. 5(b). Here, the high-concentration P+-type silicon substrate 1, the low-concentration P-type silicon layer 2, the low-concentration N-type silicon layer 3, the silicon oxide film 5, the cathode electrode wire 7, and the anode electrode wire 8 are the same as in the light-receiving element 20 according to the first embodiment. A high-concentration N+-type silicon layer 4a, which has a higher impurity concentration, is formed in the low-concentration N-type silicon layer 3 as the pattern shown in FIG. 5(c).

[0096]

20 In the light-receiving element 20c, the photonic crystal portion 21 is formed by taking advantage of the fact that the low-concentration N-type silicon layer 3 and the high-concentration N+-type silicon layer 4a have different refractive indices due to the difference in impurity concentrations therebetween. That is, as shown in FIG. 4(b) and FIG. 4(c), the high-concentration N+-type silicon layer 4a is formed so as to leave the low-concentration N-type silicon layer 3 as a pattern that has a circular planar shape and is regularly arrayed, and the portions of the low-concentration N-type silicon layer 3 that are left behind among the high-concentration N+-type silicon layer 4a become low-refractive-index portions 3a. A periodic refractive index distribution thereby arises in a direction intersecting the direction of incidence of light, thereby functioning as a photonic crystal. It is noted that, to give specific examples of refractive indices, the high-concentration N+-type silicon layer 4a is 5.6, and the low-concentration N-type silicon layer 3 (the low-refractive-index portions 3a) is 5.42.

[0097]

30 In addition, because light having a wavelength of 405 nm is contemplated for the incoming light in the present embodiment as well, the low-refractive-index portions 3a have a comparable diameter A4 of 400 nm. In addition, the spacing D4 between the low-refractive-index portions 3a is 73.5 nm on the basis of the above-mentioned refractive indices and equation (1).

[0098]

In the light-receiving element 20c as well, incoming light is subjected to Bragg reflection and thus is transmitted through the photonic crystal portion 21 unabsorbed. That is, although the high-concentration N+-type silicon layer 4a and the low-refractive-index portions 3a, which are part of the low-concentration N-type silicon layer 3, are disposed in the vicinity of the surface of the light-receiving element 20c (the portion contacting the silicon oxide film 5), incoming light is not absorbed in this portion, and, therefore, no photocarriers are generated either.

[0099]

40 Light passing through the photonic crystal portion 21 unattenuated because of not being absorbed is subsequently absorbed in the light-absorbing layer formed below the photonic crystal portion 21, thereby generating photocarriers. It is mainly the depletion layer formed at the interface between the low-concentration N-type silicon layer 3 and the low-concentration P-type silicon layer 2 that functions as the light-absorbing layer.

[0100]

Through the process described above, in the same manner as described in the first to third embodiments of the present invention, the light-receiving element 20c realizes a balance between high sensitivity and high response speed. In particular, it is a light-receiving element suitable for blue lasers.

[0101]

The light-receiving element 20c can be manufactured, for example, in the following manner.

[0102]

50 First, the steps of FIG. 2(a) and FIG. 2(b) described in the first embodiment are performed. A structure in which the high-concentration P+-type silicon substrate 1, the low-concentration P-type silicon layer 2, the low-concentration N-type silicon layer 3, and the silicon oxide film 5 are layered is thereby obtained.

[0103]

Next, as shown in FIG. 5(a), a photoresist 11 is provided as a mask, after which impurity implantation is performed to form the high-concentration N+-type silicon layer 4a. At this time, the photoresist 11 is formed so as to cover the portions of the low-concentration N-type silicon layer 3 left behind, as is, as the low-

refractive-index portions 3a. In addition, As (arsenic), for example, is used as the impurity, the ion implantation energy is 20 keV, and the ion implantation dose is $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$. The high-concentration N⁺-type silicon layer 4a, which has a higher refractive index than the low-concentration N-type silicon layer 3, is thereby formed, as shown in FIG. 5(b).

[0104]

Subsequently, the cathode electrode wire 7 and the anode electrode wire 8 are formed in the same manner as in the other embodiments, whereupon the light-receiving element 20c according to the present embodiment is formed.

[0105]

10 (Fifth Embodiment)

A light-receiving element 20d according to a fifth embodiment of the present invention will be described below with reference to the drawings. FIG. 6(a) and FIG. 6(b) are diagrams schematically illustrating the essential parts of the light-receiving element according to the first embodiment and are a plan view and a cross-sectional view, in that order. It is noted that FIG. 6(a) is a cross section along line VIa-VIa' in FIG. 6(b).

[0106]

20 Whereas the cavities 6 in the light-receiving element 20 according to the first embodiment have circular planar shapes, the light-receiving element 20d has a structure wherein cavities 6b have square planar shapes. The dimension A5 of the sides of the squares is 400 nm, which is comparable to the wavelength 405 nm of the incoming light also contemplated here; in addition, using the above-mentioned equation (1), the spacing D5 between the cavities 6b is 240 nm.

[0107]

30 The light-receiving element 20d according to the present embodiment, like the light-receiving element 20 according to the first embodiment, is also a light-receiving element that realizes a balance between high sensitivity and high response speed. That is, the cavities 6b and the high-concentration N⁺-type silicon layer 4 produce a periodic refractive index distribution, a photonic crystal portion 21 having an optical band gap corresponding to the optical wavelength range of the incoming light is formed, and incoming light is transmitted through the photonic crystal portion 21 unabsorbed. Because light absorption is performed by a layer that has a low impurity concentration and is below the photonic crystal portion 21, optical sensitivity is high, and high response speed is realized owing to the high-concentration N⁺-type silicon layer 4 being disposed in the vicinity of the surface of the light-receiving element 20d.

[0108]

It is noted that, in the present embodiment, a square shape, instead of a circular shape, has been given as an example of the planar shape of the cavities 6b, but it is not limited thereto. A polygonal shape is an example of a non-circular shape that is preferable in order to obtain the function of a photonic crystal. However, from the perspective of uniform pattern formation, reproducibility during fabrication, symmetry, and the like, a circular shape is preferable.

[0109]

40 In addition, not only in the first embodiment, but also in the light-receiving elements according to the second through fourth embodiments, it is naturally possible to use a shape other than a circular shape as the planar shape of the low-refractive-index portions.

[0110]

In addition, although only the light-receiving element portion has been described in the first to fifth embodiments described above, application is also possible to an optoelectronic integrated circuit, or a so-called OEIC, in which a transistor and the like are monolithically integrated therewith on the same substrate.

[0111]

In addition, although silicon-based photodiodes have been described, application to compound semiconductor materials is also possible. Furthermore, the light-receiving element is not limited to being a PIN-type element, and other light-receiving elements, such as avalanche photodiodes, can also be used.

INDUSTRIAL APPLICABILITY

50 [0112]

The light-receiving element according to the present invention realizes a balance between high sensitivity and high response speed and is also compatible with short-wavelength incoming light, and thus is useful as a light-receiving element used in an optical pickup device, a light-receiving element used in an optical communication element, or the like.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

[0113]

FIG. 1(a) and FIG. 1(b) are a cross-sectional view and a plan view of a light-receiving element 20 according to a first embodiment of the present invention.

FIG. 2(a) through FIG. 2(f) are cross-sectional views showing a process of manufacturing the light-receiving element 20.

FIG. 3(a) through FIG. 3(f) are diagrams illustrating a light-receiving element 20a according to a second embodiment of the present invention and the process of manufacturing the same.

FIG. 4(a) through FIG. 4(f) are diagrams illustrating a light-receiving element 20b according to a third embodiment of the present invention and a process of manufacturing the same.

FIG. 5(a) through FIG. 5(c) are diagrams illustrating a light-receiving element 20c according to the third embodiment of the present invention and the process of manufacturing the same.

FIG. 6(a) and FIG. 6(b) are a cross-sectional view and a plan view of a light-receiving element 20d according to a fifth embodiment of the present invention.

EXPLANATION OF THE REFERENCE NUMBERS

[0114]

1	High-concentration P+-type silicon substrate
2	Low-concentration P-type silicon layer
3	Low-concentration N-type silicon layer
3a	Low-refractive-index portion
4	High-concentration N+-type silicon layer
4a	-type silicon layer
5	Silicon oxide film
20 6, 6a	Cavities
7	Cathode electrode wire
8	Anode electrode wire
9	SOG layer
9a	Low-refractive-index portion
10	SiN film
10a	Low-refractive-index portion
10b	SiN film
11	Photoresist
20	Light-receiving element
30 20a	Light-receiving element
20b	Light-receiving element
20c	Light-receiving element
20d	Light-receiving element
21	Photonic crystal portion

FIG. 1

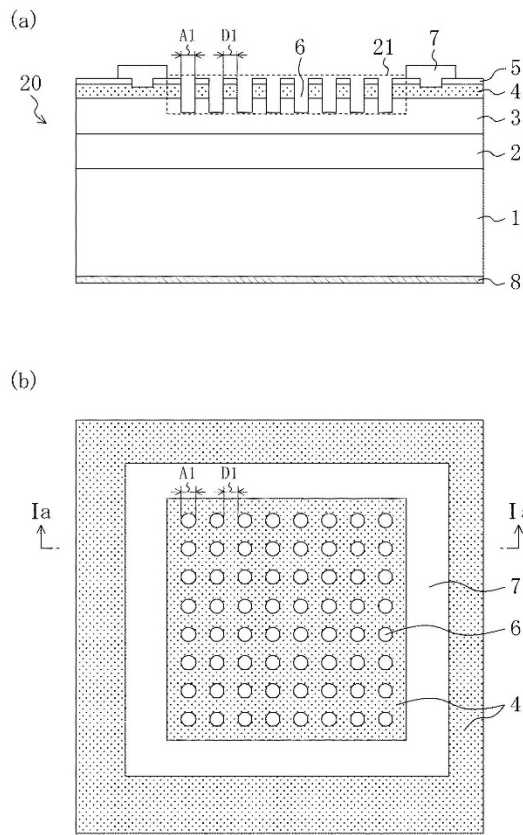


FIG. 2

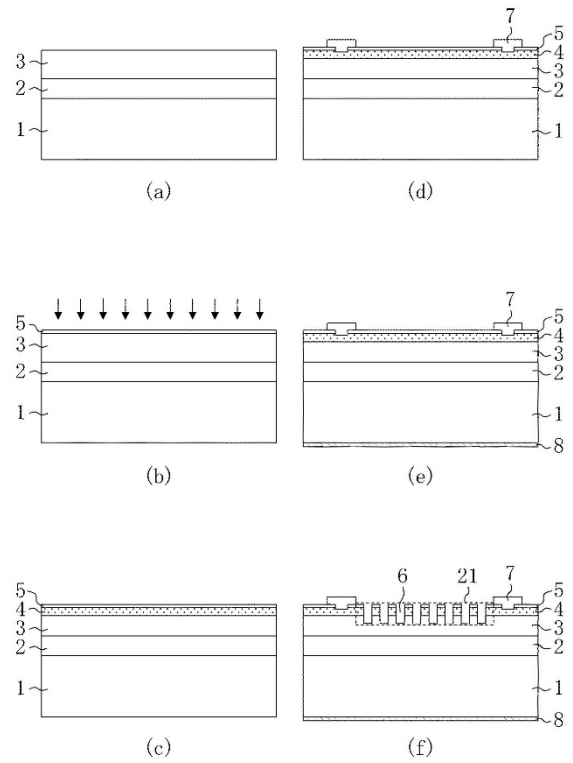


FIG. 3

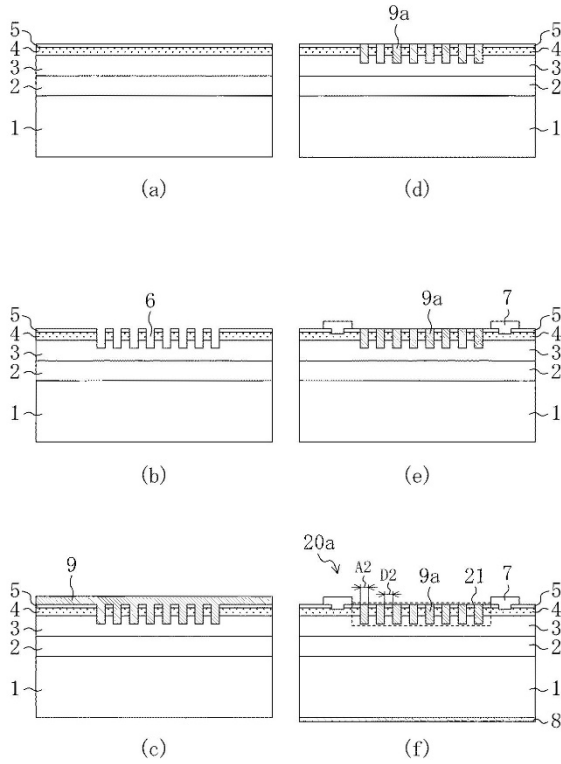


FIG. 4

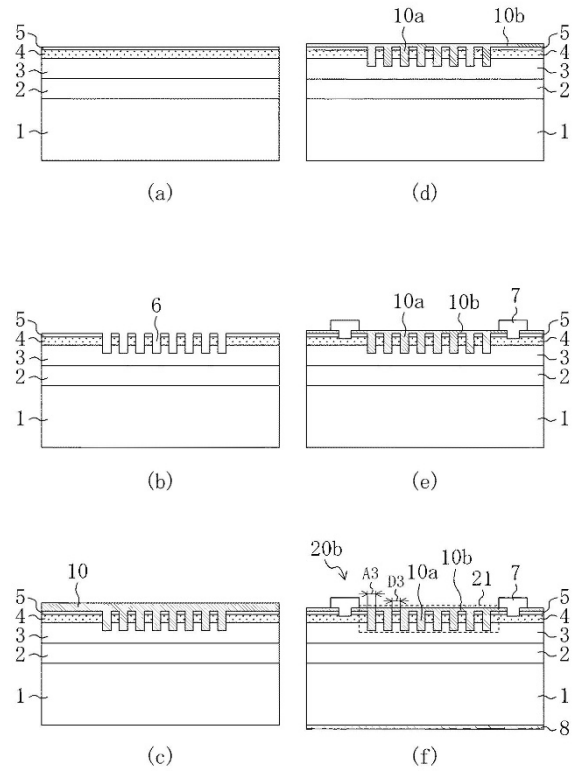


FIG. 5

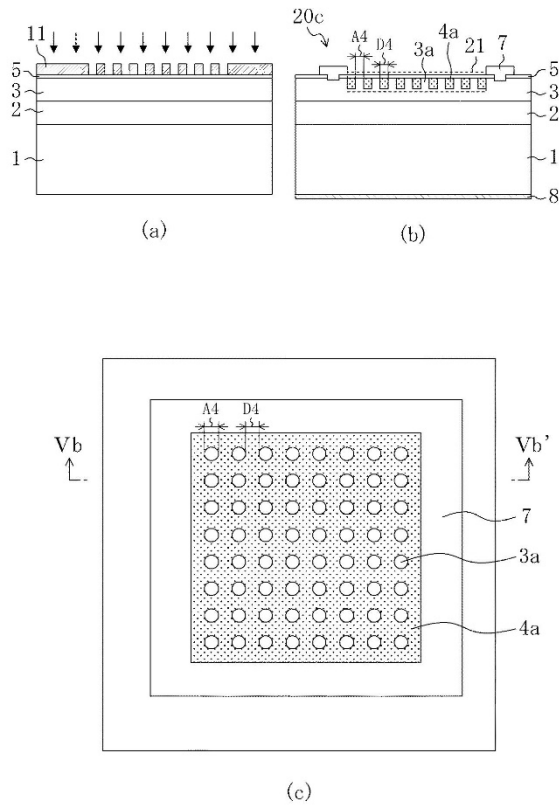
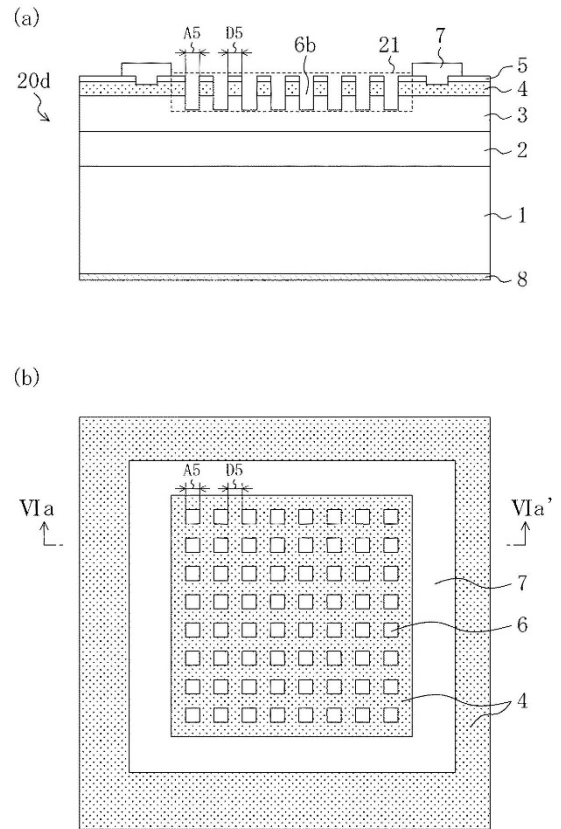


FIG. 6



Continuation of front page

(74) Agent: 100117581
Katsuya NINOMIYA, patent attorney

(74) Agent: 100117710
Tomo'o HARADA, patent attorney

(74) Agent: 100121728
Katsumori ISEKI, patent attorney

(74) Agent: 100124671
Kei SEKI, patent attorney

(74) Agent: 100131060
Yasunari SUGIURA, patent attorney

(72) Inventor: Naoki OBARA
c/o Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.
1006 Oaza Makado, Makado-shi, Osaka-fu

(72) Inventor: Yoshitaka IWAI
c/o Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.
1006 Oaza Makado, Makado-shi, Osaka-fu

(72) Inventor: Hisatada YASUKAWA
c/o Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.
1006 Oaza Makado, Makado-shi, Osaka-fu

(72) Inventor: Hiroshige TAKEHARA
c/o Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.
1006 Oaza Makado, Makado-shi, Osaka-fu

F-terms (Reference): 5F049 MA04 MB03 NA01 NA03 NB08 SZ04 SZ20

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2008-311562

(P2008-311562A)

(43) 公開日 平成20年12月25日(2008.12.25)

(51) Int.Cl. F 1 テーマコード (参考)
H O 1 L 31/10 (2006.01) H O 1 L 31/10 A 5 F O 4 9

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2007-160000 (P2007-160000)	(71) 出願人	000005821
(22) 出願日	平成19年6月18日 (2007. 6. 18)		パナソニック株式会社
			大阪府門真市大字門真1006番地
		(74) 代理人	100077931
			弁理士 前田 弘
		(74) 代理人	100110939
			弁理士 竹内 宏
		(74) 代理人	100110940
			弁理士 嶋田 高久
		(74) 代理人	100113262
			弁理士 竹内 祐二
		(74) 代理人	100115059
			弁理士 今江 克実
		(74) 代理人	100115691
			弁理士 藤田 篤史

最終頁に続く

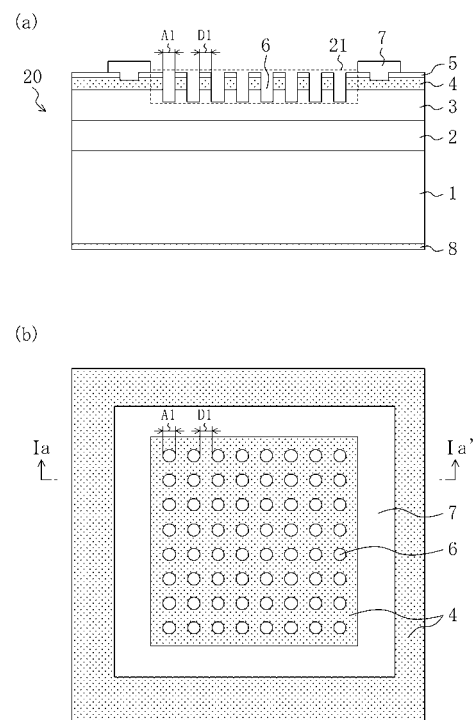
(54) 【発明の名称】 受光素子

(57) 【要約】

【課題】短波長の光に対応する受光素子において、高感度と高速応答とを両立する。

【解決手段】受光素子20は、半導体基板1と、半導体基板1上に形成され、低濃度不純物層を含み且つ所定の波長帯の光を吸収する光吸収層と、光吸収層上に形成され且つ低濃度不純物層よりも不純物濃度が高い高濃度不純物層4とを備える。少なくとも高濃度不純物層中に、高濃度不純物層よりも光に関する屈折率が小さい複数の低屈折率領域6が一定の間隔をもって配列され、半導体基板1の主面方向に周期的な屈折率分布を有することにより所定の波長帯の光を透過させるフォトニック結晶部21が構成されている。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

半導体基板と、

前記半導体基板上に形成され、低濃度不純物層を含み且つ所定の波長帯の光を吸収する光吸収層と、

前記光吸収層上に形成され且つ前記低濃度不純物層よりも不純物濃度が高い高濃度不純物層とを備え、

少なくとも前記高濃度不純物層中に、前記高濃度不純物層よりも前記所定の波長帯の光に関する屈折率が小さい複数の低屈折率領域が一定の間隔をもって配列され、それによって、前記半導体基板の主面方向に周期的な屈折率分布を有することにより前記所定の波長帯の光を透過させるフォトニック結晶部が構成されていることを特徴とする受光素子。

10

【請求項 2】

請求項 1 において、

前記複数の低屈折率領域が前記高濃度不純物層を貫通して前記光吸収層に達するように形成されていることにより、前記フォトニック結晶部が前記光吸収層に達していることを特徴とする受光素子。

【請求項 3】

請求項 1 又は 2 において、

前記複数の低屈折率領域は、少なくとも前記高濃度不純物層に設けられた複数の空洞部であることを特徴とする受光素子。

20

【請求項 4】

請求項 1 又は 2 において、

前記複数の低屈折率領域は、少なくとも前記高濃度不純物層に設けられた複数の凹部が前記高濃度不純物層よりも前記所定の波長帯の光に関する屈折率の低い材料によって埋め込まれた構造を有することを特徴とする受光素子。

【請求項 5】

請求項 4 において、

前記高濃度不純物層上に、前記複数の凹部を埋め込む前記材料から成る反射防止膜が形成されていることを特徴とする受光素子。

【請求項 6】

30

請求項 1 又は 2 において、

前記複数の低屈折率領域は、前記高濃度領域と同じ導電型であり且つ前記高濃度領域よりも不純物濃度が低い領域であることを特徴とする受光素子

【請求項 7】

請求項 1～6 のいずれか一つにおいて、

前記複数の低屈折率領域は、それぞれ円状の平面形状を有することを特徴とする受光素子。

【請求項 8】

請求項 1～7 のいずれか一つにおいて、

前記光吸収層は、前記低濃度不純物層として第 1 導電型低濃度不純物層及びその上に形成された第 2 導電型低濃度不純物層を含み、

40

前記高濃度不純物層は、第 2 導電型であることを特徴とする受光素子。

【請求項 9】

請求項 1～8 のいずれか一つにおいて、

前記複数の低屈折率領域は、前記所定の波長帯の光の波長に相当する寸法の平面形状を有することを特徴とする受光素子。

【請求項 10】

請求項 1～9 のいずれか一つにおいて、

前記高濃度不純物層の前記所定の波長帯の光に対する屈折率を n_1 、

前記複数の低屈折率領域の前記所定の波長帯の光に対する屈折率を n_2 、

50

前記所定の波長帯の中心波長を λ 、
前記複数の低屈折率領域同士の間隔をDとすると、次式
$$D = (\lambda / 2 n_1) + (\lambda / 2 n_2)$$

が成立することを特徴とする受光素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光ピックアップ装置等に用いられる受光素子に関する。

【背景技術】

【0002】

10

現在、C D-R (Compact Disk-Recordable) ドライブ、D V D (Digital Versatile Disk) ドライブ等に代表される光ディスク装置において用いられる光ピックアップ用受光素子は、主に、光ディスクにより反射されて戻って来たレーザ光を受光するためのフォトダイオードと、受光したレーザ光に基づいてフォトダイオード等の受光素子によって生成された電気信号を処理するための信号処理回路領域とから構成されている。

【0003】

近年では、光ディスク装置の高速動作化、記憶容量の大容量化の要望がある。このため、D V Dの光ピックアップシステムにおいても、光ディスクの記憶容量の大容量化を目的として、光源となる半導体レーザの短波長化が進んでいる。つまり、従来は650nmの波長の光を放出する赤色半導体レーザが用いられていたのに対し、405nmの波長を放

20

出する青色半導体レーザを使用したシステムへと変わりつつある。

【0004】

光源の短波長化に伴い、受光素子についても青色の波長に合った特性が必要となる。受光する光の波長が短波長であるほど、シリコンによる光の吸収係数は大きくなる。このため、フォトダイオードに照射された光が短波長であるほど、半導体層の表面近傍において吸収されて光キャリアが発生するようになる。

【0005】

半導体層への光の侵入長、例えば半導体表面からレーザ光の光強度が光吸収によって60%減衰する位置までの距離は、従来の赤色光(波長650nm)の場合に約4.0 μ mであるのに対し、青色光(波長405nm)の場合には約0.3 μ mである。つまり、青色光の大部分は、半導体のより浅い領域において吸収される。

30

【0006】

ここで、半導体層の不純物領域では、不純物濃度が高いほど光キャリアのライフタイムが短くなる。つまり、光吸収によって光キャリアが生じたとしても、再結合によって消滅し、外部電流として取り出される光電流には寄与しにくくなる。よって、入射光に対する感度が低下する。前記の通り、入射光の波長が短いほど半導体基板の表面近傍において吸収されるため、表面近傍における不純物濃度が高いことによる感度の低下は入射光が短波長であるほど顕著になる。

【0007】

これに対し、半導体基板表面近傍における不純物濃度が低いほど寄生抵抗が大きくなる。このことは、受光素子の応答速度が低下する原因となることが知られている。

40

【0008】

このように、感度の向上及び応答速度の向上は、受光素子の半導体層における不純物濃度に関して実現のための要求が相反するものになっている。

【0009】

これに対応する技術の例として、低濃度領域と高濃度領域とが格子状に一定間隔をおいて周期的に形成された受光素子等が提案されている(例えば、特許文献1参照)。

【特許文献1】特開2003-158251号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

50

【0010】

しかしながら、特許文献1の受光素子において、一部の光は高濃度領域に入射し、そのような光は受光感度の低い領域に吸収されることになる。このため、受光素子全体として考えると、依然として感度の低下が発生している。逆に、低濃度領域に照射される光は受光感度の高い領域に吸収されることになるが、基板表面に低濃度領域が存在するのであるから、基板表面において寄生抵抗が増大し、これによる応答速度の遅延が発生している。このように、高感度化と高速応答との両立は十分には実現されていない。

【0011】

従って、本発明は、このような課題を解決しようとなされたものであって、特に青色レーザに対して高感度且つ高速応答の両特性を満足させる受光素子を提供することを目的とする。

10

【課題を解決するための手段】

【0012】

前記の目的を達成するため、本願発明者らは、再結合による光キャリアの消滅を防ぐために不純物濃度を低くした光吸収層の上に、寄生抵抗を低減するために不純物濃度を高くした高濃度不純物層を形成し、更に、該高濃度不純物層中に入射光を透過するフォトニック結晶を構成することにより高濃度不純物層における入射光の吸収を抑えることを着想した。

【0013】

具体的には、本発明の受光素子は、半導体基板と、半導体基板上に形成され、低濃度不純物層を含み且つ所定の波長帯の光を吸収する光吸収層と、光吸収層上に形成され且つ低濃度不純物層よりも不純物濃度が高い高濃度不純物層とを備え、少なくとも高濃度不純物層中に、高濃度不純物層よりも所定の波長帯の光に関する屈折率が小さい複数の低屈折率領域が一定の間隔をもって配列され、それによって、半導体基板の主面方向に周期的な屈折率分布を有することにより所定の波長帯の光を透過させるフォトニック結晶部が構成されている。

20

【0014】

本発明の受光素子によると、光吸収層の上に形成された高濃度不純物層に、所定の波長帯の光を透過するフォトニック結晶が構成されている。このため、受光素子に入射した所定の波長の光は、高濃度不純物層のフォトニック結晶部において周期的な屈折率分布によりブラッグ反射を受け、吸収されない。つまり、入射光はフォトニック結晶部において減衰することなく透過し、その結果として、より多く光吸収層に達する。

30

【0015】

光吸収層に達した光は吸収され、光キャリア（電子及び正孔）を生じる。このとき、低濃度不純物層においては不純物濃度が低いために再結合による光キャリアの消滅は少なく、高感度である（これを実現するように低濃度不純物層の不純物濃度を設定する）。更に、受光素子の表面近傍には不純物濃度が高いことから寄生抵抗の小さい高濃度不純物層が設けられているため、高速応答である（これを実現するように、低濃度不純物層に比べて高い不純物濃度として高濃度不純物層の不純物濃度を設定する）。このように、本発明の受光素子は高感度と高速応答との両立を実現している。

40

【0016】

尚、複数の低屈折率領域が高濃度不純物層を貫通して光吸収層に達するように形成されていることにより、フォトニック結晶部が光吸収層に達していることが好ましい。

【0017】

このようにすると、受光素子に入射した光は、フォトニック結晶部が構成されていない部分の高濃度不純物層を通ることなく光吸収層に達することができる。これにより、応答速度及び光感度の更なる向上が実現する。

【0018】

まず、応答速度の更なる向上について説明する。

【0019】

50

光の入射によって光キャリアである電子及び正孔が生じると、電子はカソードに、正孔はアノードに移動し、光電流に寄与する。光吸収層において電子及び正孔が生じた場合、これら電子及び正孔は電界ドリフトによって速やかに光吸収層外まで運ばれ、その後、それぞれカソード及びアノードまで移動する。

【0020】

これに対し、光吸収層の上に設けられている高濃度不純物層において光キャリアが生じた場合、電子、正孔のいずれか一方は拡散によって光吸収層まで移動した後に前記と同様にカソード又はアノードに運ばれる。このとき、高濃度不純物層における拡散による光キャリアの移動は、光吸収層における電界ドリフトによる移動に比べて大幅に遅い。この結果、高濃度不純物層において対として発生した光キャリアである電子・正孔の両方がカソード・アノードに到達するまでの時間は、光吸収層において発生した光キャリアの場合に比べて長くなる。つまり、高濃度不純物層において生じる光キャリアは、応答速度が低下する原因となる。

10

【0021】

そこで、前記の通り光吸収層に達するようにフォトリック結晶部を設けることにより、高濃度不純物層における光キャリアの発生を防ぎ、応答速度を向上することができる。

【0022】

次に、光感度の更なる向上は、光キャリアが再結合により消滅しやすい高濃度不純物層における吸収を避けることができるため、感度の低下を防ぐことができることによる。このようにして、応答速度及び光感度の更なる向上が実現する。

20

【0023】

また、本発明の受光素子において、複数の低屈折率領域は、少なくとも高濃度不純物層に設けられた複数の空洞部であることが好ましい。

【0024】

シリコン等により形成された高濃度不純物層に比べ、空洞部の屈折率は小さい。そのため、高濃度不純物層に複数の空洞部を配置することにより周期的な屈折率分布を実現し、フォトリック結晶部とすることができる。

【0025】

また、複数の低屈折率領域は、少なくとも高濃度不純物層に設けられた複数の凹部が高濃度不純物層よりも所定の波長帯の光に関する屈折率の低い材料によって埋め込まれた構造を有することが好ましい。

30

【0026】

このようにすると、高濃度不純物層を構成する材料とそれよりも屈折率の低い材料との屈折率の違いにより周期的な屈折率分布を実現し、フォトリック結晶部とすることができる。このとき、望みの屈折率を有する材料を選択して凹部を埋め込むことにより任意の屈折率差を発生させることができるため、より容易に所定の波長帯の光を透過させるフォトリック結晶部を得ることができる。

【0027】

また、このような構造において、高濃度不純物層上に、複数の凹部を埋め込む材料から成る反射防止膜が形成されていることが好ましい。

40

【0028】

このようにすると、凹部を低屈折率の材料により埋め込んだ構造の低屈折率領域を設ける前記の効果に加え、反射防止膜より受光素子の表面における光の反射を抑制し、入射する光を増加することにより受光素子の感度を向上することができる。特に、長波長の光に対する反射防止性と、短波長の光に対するフォトリック結晶部の光透過性とを同時に実現し、広範囲の波長域に対して高感度と高速応答とを両立することができる。

【0029】

また、複数の低屈折率領域は、高濃度領域と同じ導電型であり且つ高濃度領域よりも不純物濃度が低い領域であることが好ましい。

【0030】

50

つまり、同一導電型の不純物の濃度差によって屈折率に差が生まれることを利用して周期的な屈折率分布を実現し、フォトニック結晶部とすることが好ましい。ここで、不純物濃度の差を設定することにより屈折率の差を設定することができ、望みの波長帯の光を透過するフォトニック結晶部とすることができる。

【0031】

複数の低屈折率領域は、それぞれ円状の平面形状を有することが好ましい。

【0032】

円状の低屈折率領域とすると、均一なパターン成形の再現性が高く、また、対称性も高い。このことが、望みの波長帯の光を透過するフォトニック結晶部を実現するために望ましい。

【0033】

また、光吸収層は、低濃度不純物層として第1導電型低濃度不純物層及びその上に形成された第2導電型低濃度不純物層を含み、高濃度不純物層は、第2導電型であることが好ましい。

【0034】

このようにすると、第1導電型低濃度不純物層と第2導電型低濃度不純物層との界面に構成される空乏層において光吸収を行うことができる。

【0035】

また、複数の低屈折率領域は、所定の波長帯の光の波長に相当する寸法の平面形状を有することが好ましい。更に、高濃度不純物層の所定の波長帯の光に対する屈折率を n_1 、複数の低屈折率領域の所定の波長帯の光に対する屈折率を n_2 、所定の波長帯の中心波長を λ 、複数の低屈折率領域同士の間隔を D とすると、次式 $D = (\lambda / 2 n_1) + (\lambda / 2 n_2)$ が成立することが好ましい。

【0036】

このようにすると、高濃度不純物層と低屈折率領域とによって、所定の波長帯の光を透過させるフォトニック結晶部が確実に構成される。

【発明の効果】

【0037】

以上説明したように、本発明に係る受光素子によると、受光素子の表面近傍に形成された高濃度不純物層中に所定の波長帯の光を透過するフォトニック結晶部が構成されていることにより、入射光は高濃度不純物層において吸収されることなくその下の低濃度不純物層を含む光吸収層に達する。これにより、高濃度不純物層におけるキャリアの再結合及び受光素子の表面近傍における寄生抵抗をいずれも抑制し、高感度と高速応答とを両立した受光素子となっている。特に、素子の表面近傍にて吸収されやすい短波長の光、例えば青色レーザに適した高性能な受光素子を提供することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0038】

以下に、本発明の各実施形態に係る受光素子について図面を参照しながら説明する。尚、複数の図面に渡って現れる同様の構成要素には同じ符号を付し、それによって詳しい説明を省略する場合もある。

【0039】

(第1の実施形態)

図1(a)及び(b)は、第1の実施形態に係る受光素子の要部を模式的に示す図であり、順に平面及び断面図である。尚、図1(a)は、図1(b)におけるIa-Ia'線による断面である。

【0040】

図1(a)に示す通り、本実施形態の受光素子20はPINフォトダイオードとして構成されている。具体的に述べると、受光素子20は高濃度P+型シリコン基板1を用いて形成されており、高濃度P+型シリコン基板1上に、低濃度P型シリコン層2(膜厚15 μm)、低濃度N型シリコン層3(膜厚5 μm)、高濃度N+型シリコン層4及びシリコ

ン酸化膜 5 が下からこの順に積層されている。また、シリコン酸化膜 5 を貫通して高濃度 N+ 型シリコン層 4 に達するようにカソード電極配線 7 が設けられると共に、高濃度 P+ 型シリコン基板 1 の裏面（低濃度 P 型シリコン層 2 等が形成されている面の反対側の面）にはアノード電極配線 8 が設けられている。

【0041】

N 型である層と P 型である層の界面、つまり、低濃度 P 型シリコン層 2 と低濃度 N 型シリコン層 3 との界面は PN 接合を構成するから、この部分に空乏層が形成される。主に該空乏層が光吸収層として機能する。

【0042】

また、高濃度 N+ 型シリコン層 4（及びシリコン酸化膜 5）をそれぞれ貫通して低濃度 N 型シリコン層 3 に達する複数の空洞部 6 が形成されている。空洞部 6 は高濃度 N+ 型シリコン層の下面よりも深く形成されていても良い。図 1（a）の受光素子 20 はそのような例であり、シリコン酸化膜 5 の膜厚が 100 nm 程度であるのに対して空洞部 6 の深さは 500 nm 程度である。

【0043】

図 1（b）に示す通り、空洞部 6 は円状の平面形状を有すると共に、等間隔に規則的に設けられている。尚、図 1（b）においてシリコン酸化膜 5 の図示は省略している。

【0044】

空洞部 6 の屈折率（1.0）は高濃度 N+ 型シリコン層 4 の屈折率（5.6）よりも低く、また、それぞれ同じ直径 A1 を有する複数の空洞部 6 は等間隔に設けられている。このため、高濃度 N+ 型シリコン層 4 と複数の空洞部 6 とにより、高濃度 P+ 型シリコン基板 1 の主面方向に周期的な屈折率分布が生じてフォトニック結晶部 21 を構成している。

【0045】

本実施形態の受光素子 20 は、青色レーザ（波長 405 nm）を受光するためのものである。そこで、空洞部 6 の直径 A1 は入射光（レーザ光）の波長とほぼ同じ 400 nm としている。また、空洞部 6 同士の間隔 D1 は 240 nm であり、それぞれ独立して配列されている。このように、フォトニック結晶として機能させるためには、入射光の波長と同等サイズのパターンとして複数の低屈折率の空洞部 6 を配置する。

【0046】

このような構成の本実施形態の受光素子 20 において、例えば光ディスクにより反射されたレーザ光が受光素子 20 の表面に照射されると、フォトニック結晶部 21 において、主面方向（入射方向に交差する方向）の周期的な屈折率分布のためにブラッグ反射を受ける。この結果、レーザ光の光波長域に光学的バンドギャップをもつフォトニック結晶部 21 中では吸収されず、レーザ光はフォトニック結晶を構成する空洞部 6 又は N+ 型シリコン層 4 を透過する。この結果、高濃度 N+ 型シリコン層 4 よりも深い領域に形成された、不純物濃度の低い低濃度 N 型シリコン層 3 までレーザ光が減衰することなく到達する。

【0047】

その後、光吸収係数の大きい青色光は低濃度 N 型シリコン層 3 及び低濃度 P 型シリコン層 2 において吸収され、これらの界面における空乏層内にて光キャリア（電子及び正孔）に変換される。発生した光キャリアのうちの電子は、電界ドリフトによって速やかに受光素子表面側の高濃度 N+ 型シリコン層 4 へと吸い上げられる。図 1（b）に示す通り、複数の空洞部 6 が互いに独立している（接続されていない）ため、高濃度 N+ 型シリコン層 4 は受光素子 20 の主面方向について連続しており、吸い上げられた電子は高濃度 N+ 型シリコン層 4 内を通過して容易にカソード電極配線 7 に到達することができる。尚、発生した光キャリアのうちの正孔は、アノード電極配線 8 の側に移動して光電流に寄与する。

【0048】

このように、本実施形態の受光素子 20 によると、フォトニック結晶部 21 が構成されていることにより、その光学的バンドギャップに相当する波長の光は高濃度 N+ 型シリコン層 4 においては吸収されず、その下方の低濃度 N 型シリコン層 3 及び低濃度 P 型シリコン層 2 に到達する。つまり、再結合が顕著であって感度低下の原因となる高濃度の不純物

層における光の吸収を避け、低濃度の不純物層において光を吸収させることができる。

【0049】

更に、受光素子20表面近傍には寄生抵抗の小さい高濃度N+型シリコン層4が設けられており、発生した光キャリアは該高濃度N+型シリコン層4を通して拡散するため、応答速度は向上している。

【0050】

よって、本実施形態の受光素子20は高感度と高速応答との両立を実現し、シリコンに関する吸収係数が大きくなる短波長の光である青色レーザ（波長405nm）に適した受光素子となっている。

【0051】

具体例として、受光素子20では入射光の波長 $\lambda = 405\text{ nm}$ に対して感度が 0.3 A/W 、周波数が -1 dB において 220 MHz の特性を示す受光素子20が得られた。従来の受光素子の場合、同じ入射光の波長 $\lambda = 405\text{ nm}$ に対し、例えば感度が 0.26 A/W 、周波数特性が -1 dB において 200 MHz であった。このように、本実施形態の受光素子20は確かに高感度と高速応答とを両立している。

【0052】

尚、低屈折率領域のパターンサイズとして、空洞部6の直径A1を入射光の波長（レーザ光の波長、405nm）と同等の400nmとした本実施形態の例は望ましい構成である。しかし、レーザ光に波長分布が存在することを考慮すると、入射光の中心波長に対して $\pm 50\text{ nm}$ 程度の寸法に空洞部6の直径を設定するのがよい。このように、波長405nm等の単一波長の入射光の場合に限るわけではなく、入射光の波長分布を考慮して、ばらつきを考慮した様々な波長の光に適する構成とすることもできる。

【0053】

また、本実施形態では、高濃度P+型シリコン基板1を用いる例を説明しているが、これには限らず、各構成要素についていずれも逆の導電型を有する構成とすることもできる。更に、アノード電極配線8を高濃度P+型シリコン基板1の裏面に形成する例を説明しているが、これには限らない。例えば、アノード・カソード間に絶縁分離層を設け、高濃度P+型シリコン基板1に接続するコンタクト層を表面（受光素子20のシリコン酸化膜5の形成されている側）の側から形成し、表面にアノード電極を引き出す構成とすることも可能である。

【0054】

次に、本実施形態の受光素子20の製造方法について図面を参照して説明する。図2（a）～（f）は、受光素子20の製造方法、中でも受光領域を形成する工程を説明するための断面図である。

【0055】

まず、図2（a）に示す通り、不純物濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 程度の高濃度P+型シリコン基板1上に、エピタキシャル成長法により、比抵抗 $100\text{ }\Omega\text{ cm}$ 程度で且つ厚みが $20\text{ }\mu\text{ m}$ 程度の低濃度P型シリコン層2を形成する。続いて、低濃度P型シリコン層2上に、同じくエピタキシャル成長法を用い、比抵抗が $100\text{ }\Omega\text{ cm}$ 程度で且つ膜厚が $10\text{ }\mu\text{ m}$ 程度の低濃度N型シリコン層3を形成する。尚、低濃度P型シリコン層2及び低濃度N型シリコン層3の不純物濃度は、両者が空乏化することにより発生した光キャリアが再結合によって消失するのを避けられるように設定する。

【0056】

次に、図2（b）に示す通り、低濃度N型シリコン層3上にシリコン酸化膜5（例えば熱酸化膜）を形成する。

【0057】

この後、図2（c）に示す通り、マスキング処理を用いて必要な範囲の低濃度N型シリコン層3に対して不純物注入を行う。これにより、低濃度N型シリコン層3の上部に高濃度N+型シリコン層4を形成する。この際、例えば、不純物としてAs（ヒ素）を用い、イオン注入エネルギー 20 keV で且つイオン注入量 $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ のドーピング条

件とする。このようなドーピング条件（高濃度N＋型シリコン層4の不純物濃度）は、受光素子の高速応答を実現するため、高濃度N＋型シリコン層4の寄生抵抗が十分小さくなるように設定する。

【0058】

次に、図2（d）に示す通り、高濃度N＋型シリコン層4上に形成したシリコン酸化膜5にコンタクトホールを設ける。該コンタクトホールを介して高濃度N＋型シリコン層4に接続するように、カソード電極配線7を形成する。

【0059】

また、図2（e）に示す通り、高濃度P＋型シリコン基板1の裏面にアノード電極配線8を形成する。

【0060】

次に、図2（f）に示す工程を行う。つまり、アノード電極配線8及びカソード電極配線7の形成の後、リソグラフィ技術を用いて所定のパターンのマスクを形成し、異方性のドライエッチングにより、高濃度N＋型シリコン層4を貫通するように複数の空洞部6を形成する。

【0061】

ここで、複数の空洞部6は、図1（b）に示すように、互いに接することなく高濃度N＋型シリコン層4中に配列して形成する。また、空洞部6はそれぞれ入射光の波長とほぼ同じ400nmの直径A1を有する円形の平面形状とする。空洞部6同士の間隔D1は240nmである。

【0062】

また、空洞部6の深さはシリコン酸化膜5の表面から500nm程度としている。これは、高濃度N＋型シリコン層4の深さは400nm程度であるから、図2（f）の通り、空洞部6はこれよりも深く形成されている。後に説明する通り、フォトニック結晶部21は低濃度N型シリコン層3に達していることが望ましく、また、空洞部6が低濃度N型シリコン層3の上面よりも深く形成されていることに大きな問題は無い。このため、加工精度等の観点から、空洞部6は低濃度N型シリコン層3の上面よりも深く形成するのがよい。

【0063】

空洞部6を形成することにより、相対的に屈折率の高い高濃度N＋型シリコン層4中に相対的に屈折率の低い空洞部6が入射光の波長と同等サイズのパターンをもって規則配列されることになる。これによりフォトニック結晶部21が構成され、先に説明したように、レーザ光はフォトニック結晶部21部分を吸収されずに通過し、不純物濃度の低い低濃度N型シリコン層3に到達した後に吸収される。このように、青色レーザの受光に関して高感度と高速応答とを両立させた受光素子20を製造することができる。

【0064】

尚、ここでは高濃度N＋型シリコン層4上にシリコン酸化膜5が形成されている状態において空洞部6を形成した。しかし、シリコン酸化膜5上に積層する別の膜、例えばSiN膜等が形成されていても良いし、更に別の膜が形成されていても構わない。

【0065】

また、本実施形態において、空洞部6はいずれも高濃度N＋型シリコン層4を貫通して低濃度N型シリコン層3に達しており、これによってフォトニック結晶部21も低濃度N型シリコン層3に達している。これは、受光素子の感度向上及び応答速度向上のためには望ましい構成である。しかし、空洞部6が高濃度N＋型シリコン層4を貫通しておらず、つまり、高濃度N＋型シリコン層4内に納まるように形成されている構成とすることも可能である。

【0066】

この場合、空洞部6が形成されている範囲にフォトニック結晶部が構成され、当該フォトニック結晶部の範囲において入射光の吸収が防がれる。フォトニック結晶部の範囲外の部分の高濃度N＋型シリコン層4においては、再結合によって光キャリアが減少する。ま

た、再結合によって消滅せず光電流に寄与する光キャリアについても、応答速度を低下させる原因となる。

【0067】

先に述べた通り、低濃度N型シリコン層3と低濃度P型シリコン層2との界面に生じる空乏層において生じた光キャリアは、電界ドリフトによって速やかに移動する。この際、光キャリアのうちの正孔はアノード電極配線8の側に移動する。これに対し、フォトリソニック結晶部21の範囲外の部分の高濃度N+型シリコン層4において光キャリアが生じた場合、そのうちの正孔は、拡散によって前記の空乏層まで移動する必要がある。この際の移動速度は、電界ドリフトによる移動に比べて大幅に遅い。そのため、空乏層内において生じた正孔に比べてアノード電極配線8に到達するまでの時間が遅く、このことは、応答速度を低下させる原因となる。

10

【0068】

このようなことから、空洞部6が低濃度N型シリコン層3に達していない構造であっても感度向上の効果は発揮されるが、より望ましくは、図1(a)に示したように空洞部6が低濃度N型シリコン層3に達している構造とするのがよい。

【0069】

(第2の実施形態)

続いて、本発明の第2の実施形態に係る受光素子20aについて、図面を参照しながら説明する。図3(a)～(f)は、受光素子20a、特にその受光領域を製造する工程を示す断面図である。

20

【0070】

本実施形態の受光素子20aの断面は、図3(f)に示されている。これは、図1(a)に示す第1実施形態の受光素子20において、空洞部6がSOG(Spin on Glass)等の低屈折率材料によって埋め込まれた複数の低屈折率部9aとなっている構成と考えれば良い。よって、低屈折率部9aは、図1(b)に示すのと同様に円形の平面形状を有し且つ互いに独立して等間隔に配列されている。尚、低屈折率材料とは、高濃度N+型シリコン層4に比べて入射光に対する屈折率が低い材料であることを言う。

【0071】

但し、低屈折率部9aのパターンの直径A2は受光素子20の空洞部6と同じ400nm(想定する入射光の波長405nmと同等)であるが、受光素子20の空洞部6の間隔D1は240nmであるのに対し、低屈折率部9aの間隔D2は180nmとなっている。

30

【0072】

受光素子20aにおいても、高濃度N+型シリコン層4とそこに規則配置された低屈折率部9aとによって、レーザ光の入射方向に交差する方向に周期的な屈折率分布が生じ、フォトリソニック結晶部21が構成されている。このため、第1の実施形態の場合と同様に、入射光の光波長域に光学的バンドギャップを持つフォトリソニック結晶部21において入射光はブラッグ反射を受け、吸収されることなく透過されて低濃度N型シリコン層3に到達する。この後、低濃度N型シリコン層3と低濃度P型シリコン層2との界面から構成される空乏層において入射光が吸収されて光キャリアが生じる。

40

【0073】

このことから受光素子20aの感度向上が実現すると共に、低濃度N型シリコン層3上に形成されている高濃度N+型シリコン層4のために寄生抵抗が小さくなっている結果として応答速度が向上している点については、第1の実施形態の場合と同様である。

【0074】

尚、空洞部6に充填する低屈折率材料は、SOGには限定されず、入射光の波長及び周期パターンの間隔に応じて選択すればよい。逆に、屈折率の決まった材料を用いることにより、フォトリソニック結晶部21のパターン間隔を設定することができる。例えば、波長405nmの光に対して高濃度N+型シリコン層4の屈折率 $n = 5.42$ よりも小さい屈折率を有すると共に、波長405nmの光を透過する材料であれば良い。このような材料を

50

用いると、フォトニック結晶部 2 1 を構成して光学的バンドギャップを発生させることができる。

【0075】

フォトニック結晶において、材料の屈折率とパターン間隔とは次のような関係を有する。つまり、入射光の波長（入射光の波長分布を考えるのであれば、中心波長）を λ 、該入射光に対する高屈折率材料及び低屈折率材料の屈折率を順に n_1 及び n_2 、周期間隔（ここでは、低屈折率部 9 a 同士の間隔）を D とすると、次式（1）

$$D = (\lambda / 2 n_1) + (\lambda / 2 n_2) \quad (n_1 > n_2) \quad \dots (1)$$

の関係を満たすのであれば、フォトニック結晶を実現し、光学的バンドギャップを発生させることができる。本実施形態の場合、SOGの屈折率は1.42程度であり、式（1）から、先に示した通り間隔 D を180nmとしている。

10

【0076】

尚、この式（1）の関係から、低屈折率の材料を用いるほど周期間隔 D を大きくすることができる。周期間隔 D が大きい方がパターン形成は容易であるから、より低屈折率の材料を用いることが望ましい。

【0077】

本実施形態の受光素子 2 0 a は、例えば次のようにして製造することができる。まず、図 3（a）に示す構造は、第 1 の実施形態において図 2（c）に示した構造と同様であり、図 2（a）及び（b）に示す工程によって形成される。

【0078】

次に、図 3（b）に示すように、低濃度N型シリコン層 3 を貫通する複数の空洞部 6 を形成する。このためには、リソグラフィによってマスクング処理し、異方性ドライエッチング処理を行った。平面形状及び配置は図 1（b）と同様であり、但し前記の通り空洞部 6 の直径 A が400nmで且つその間隔 D は180nmである。

20

【0079】

次に、図 3（c）に示す通り、空洞部 6 を充填し且つシリコン酸化膜 5 上を覆う SOG 層 9 をスピンコート法によって形成する。

【0080】

次に、図 3（d）に示す通り、CMP（Chemical Mechanical Polishing）法を用いて、空洞部 6 からはみ出している部分の SOG を除去する。これにより、空洞部 6 が SOG によって充填された低屈折率部 9 a を形成する。

30

【0081】

次に、図 3（e）に示すように、シリコン酸化膜 5 を貫通するコンタクトホールを形成し、該コンタクトホールを介して高濃度N+型シリコン層 4 に接続するカソード電極配線 7 を形成する。その後、図 3（f）に示すように、高濃度P+型シリコン基板 1 の裏面にアノード電極配線 8 を形成する。

【0082】

（第 3 の実施形態）

以下に、本発明の第 3 の実施形態に係る受光素子 2 0 b について、図面を参照しながら説明する。図 4（a）～（f）は、受光素子 2 0 b、特にその受光領域を製造する工程を示す断面図である。

40

【0083】

本実施形態の受光素子 2 0 b の断面は、図 4（f）に示されている。これは、図 1（a）に示す第 1 実施形態の受光素子 2 0 において、空洞部 6 が SiN によって埋め込まれて低屈折率部 1 0 a となっていると共に、同じ SiN によって SiN 膜 1 0 b が形成されている構造と考えることができる。但し、ここでも波長 405nm の光を受光することを想定し、低屈折率部 1 0 a のパターンの直径 A は受光素子 2 0 と同じ 400nm であるが、低屈折率部 1 0 a 同士の間隔 D は140nmとしている。このような間隔 D の値は、SiNの屈折率が2.00であることから、前記の式（1）を用いて決定される。

【0084】

50

SiNは高濃度N+型シリコン層4に比べて低屈折率であるから、空洞部6をSiNによって充填した構成の低屈折率部10aが入射光の波長と同等サイズのパターンに規則的に配置されることにより、入射光と交差する方向に周期的な屈折率分布が生じている。これにより、入射光の光波長域に光学的バンドギャップを有するフォトニック結晶部21が構成され、入射光はブラッグ反射を受けるために吸収されることなく透過して低濃度N型シリコン層3に到達する。この後は、先の実施形態においても説明した通りに光キャリアの発生と移動が起こり、感度向上及び応答速度向上が共に実現した受光素子20bとなっている。

【0085】

更に、本実施形態の受光素子20bにおいて、シリコン酸化膜5及び低屈折率部10aを覆うように、低屈折率部10aと同じSiNによってSiN膜10bが形成されている。SiN膜10bとシリコン酸化膜5との積層膜は、赤色～赤外光に対する反射防止膜として機能する。このため、受光素子20bは、フォトニック結晶部21のために短波長光に対して透過性に優れると共に、長波長光に対して反射防止性に優れる。

【0086】

従って、受光素子20bは、青色光等の短波長から赤外光等の長波長までに亘る広範囲の波長を効率良く受光することができると共に、高感度と高速応答とを両立する高性能な特性を示すものとなっている。

【0087】

尚、高濃度N+型シリコン層4内に形成されている低屈折率部10a同士は互いに独立しているため、高濃度N+型シリコン層4は受光素子の主面方向に連続している。よって、低屈折率部10a同士が同じ材料により形成されたSiN膜10bを介して繋がっていると考えることはできるが、このことに関わりなく、キャリアが高濃度N+型シリコン層4内を主面方向に移動する経路は確保されている。

【0088】

本実施形態の受光素子20aは、例えば次のようにして製造することができる。まず、図4(a)に示す構造は、第1の実施形態において図2(c)に示した構造と同様であり、図2(a)及び(b)に示す工程によって形成される。

【0089】

次に、図4(b)に示すように、低濃度N型シリコン層3を貫通する複数の空洞部6を形成する。このためには、リソグラフィによってマスキング処理し、異方性ドライエッチング処理を行った。平面形状及び配置は図1(b)と同様であり、但し前記の通り空洞部6の直径A3が400nmで且つその間隔D3は140nmである。

【0090】

次に、図4(c)に示すように、空洞部6を充填し且つシリコン酸化膜5上を覆うSiN膜10をプラズマCVD法等により形成する。これにより、空洞部6がSiNによって充填された低屈折率部10aが形成される。この後、図4(d)に示すように、CMP法によりSiN膜10を研磨して望みの厚さにSiN膜10bを残す。これにより、SiN膜10bとシリコン酸化膜5との積層膜が反射防止膜として機能する。

【0091】

このように、低屈折率部10aと反射防止膜を得るためのSiN膜10bとを同じ材料によって形成することにより、受光素子20bの製造工程を簡略化することができる。

【0092】

この後、図4(e)に示すようにSiN膜10b及びシリコン酸化膜5を貫通して高濃度N+型シリコン層4に接続するカソード電極配線7を形成する。更に、図4(f)に示すように、高濃度P+型シリコン基板1の裏面にアノード電極配線8を形成する。

【0093】

以上により、本実施形態の受光素子20bが製造される。尚、SiNを材料として低屈折率部10aを構成すると共に反射防止膜の一部となるSiN膜10bを形成したが、これに限定するわけではない。

【0094】

(第4の実施形態)

続いて、本発明の第4の実施形態に係る受光素子20cについて、図面を参照しながら説明する。図5(a)及び(b)は、受光素子20c、特にその受光領域を製造する工程を示す断面図である。また、図5(c)には、受光素子20cの平面図が示されている。

【0095】

本実施形態の受光素子20cの断面は、図5(b)に示されている。ここで、高濃度P+型シリコン基板1、低濃度P型シリコン層2、低濃度N型シリコン層3、シリコン酸化膜5、カソード電極配線7及びアノード電極配線8については、第1の実施形態の受光素子20と同様である。低濃度N型シリコン層3中に、より不純物濃度の高い高濃度N+型シリコン層4aが図5(c)に示すパターンとして形成されている。

10

【0096】

受光素子20cにおいて、フォトニック結晶部21は、低濃度N型シリコン層3と、高濃度N+型シリコン層4aとは不純物濃度に違いにより屈折率が異なることを利用して構成されている。つまり、図4(b)及び(c)に示す通り、円形の平面形状を有し且つ規則的に配列するパターンとして低濃度N型シリコン層3を残すように高濃度N+型シリコン層4aが形成され、高濃度N+型シリコン層4aの間に残された部分の低濃度N型シリコン層3が低屈折率部3aとなっている。これにより、光の入射方向に対して交差する方向に、周期的な屈折率分布が生じており、フォトニック結晶として機能する。尚、屈折率の具体例を挙げると、高濃度N+型シリコン層4aは5.6、低濃度N型シリコン層3(低屈折率部3a)は5.42である。

20

【0097】

また、低屈折率部3aの直径A4は、本実施形態においても入射光として波長405nmの光を想定していることからそれと同等の400nmである。また、低屈折率部3a同士の間隔D4は、前記の屈折率と式(1)とから、73.5nmとしている。

【0098】

受光素子20cにおいても、入射した光は、ブラッグ反射を受けるためにフォトニック結晶部21を吸収されることなく透過する。つまり、受光素子20cの表面近傍(シリコン酸化膜5に接する部分)において、高濃度N+型シリコン層4aと低濃度N型シリコン層3の一部である低屈折率部3aとが配置されているが、この部分において入射光は吸収されず、そのため光キャリアも生じない。

30

【0099】

吸収されないため減衰することなくフォトニック結晶部21を透過した光は、その後、フォトニック結晶部21の下方に構成されている光吸収層において吸収され、光キャリアを生じる。光吸収層として機能するのは、主に、低濃度N型シリコン層3と低濃度P型シリコン層2との界面に構成される空乏層である。

【0100】

以上から、本発明の第1～第3の実施形態において説明したのと同様に、高感度と高速応答とを両立した受光素子20cとなっている。特に、青色レーザーに適した受光素子となっている。

40

【0101】

受光素子20cは、例えば次のようにして製造することができる。

【0102】

まず、第1の実施形態において説明した図2(a)及び(b)の工程を行う。これにより、高濃度P+型シリコン基板1、低濃度P型シリコン層2、低濃度N型シリコン層3及びシリコン酸化膜5が積層された構造が得られる。

【0103】

次に、図5(a)に示すように、フォトリソスト11をマスクとして設けた後に不純物の注入を行い、高濃度N+型シリコン層4aを形成する。この際、低屈折率部3aとして低濃度N型シリコン層3のままに残す部分を覆うようにフォトリソスト11を形成してお

50

く。また、不純物としては例えばAs（ヒ素）を用い、イオン注入エネルギーを20keV、イオン注入量を $5 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ とする。これにより、図5（b）に示すように、低濃度N型シリコン層3よりも屈折率の高い高濃度N+型シリコン層4aが形成される。

【0104】

この後、他の実施形態と同様にしてカソード電極配線7及びアノード電極配線8を形成すると、本実施形態の受光素子20cが形成される。

【0105】

（第5の実施形態）

以下に、本発明の第5の実施形態に係る受光素子20dについて図面を参照しながら説明する。図6（a）及び（b）は、第1の実施形態に係る受光素子の要部を模式的に示す図であり、順に平面を及び断面図である。尚、図6（a）は、図6（b）におけるVIa-VIa'線による断面である。

【0106】

受光素子20dは、第1の実施形態に係る受光素子20の空洞部6が円形の平面形状を有するのに対し、正形状の平面形状を有する空洞部6bとした構造である。正方形の辺の寸法A5は、ここでも想定している入射光の波長405nmと同等の400nmであり、また、空洞部6b同士の間隔D5は前記の式（1）を用いて240nmとしている。

【0107】

本実施形態の受光素子20dも、第1の実施形態の受光素子20と同様に、高感度と高速応答とを両立する受光素子となっている。つまり、空洞部6bと高濃度N+型シリコン層4とによって周期的な屈折率分布が生じ、入射光の光波長域に相当する光学的バンドギャップを有するフォトリック結晶部21が構成され、入射光はフォトリック結晶部21部分を吸収されることなく透過する。光吸収はフォトリック結晶部21の下方の不純物濃度の低い層によって行われるために光感度が高く、また、受光素子20dの表面近傍には高濃度N+型シリコン層4が配置されているために高速応答が実現している。

【0108】

尚、本実施形態では円状に代える空洞部6bの平面形状として正形状を例としたが、これに限定されることもない。円状の他の例としては、多角形状であることがフォトリック結晶としての機能をえるために望ましい。但し、均一なパターン形成及び加工の際の再現性、対称性等の観点からは、円状であることが望ましい。

【0109】

また、第1の実施形態に限らず、第2～第4の実施形態に係るそれぞれの受光素子についても、低屈折率部の平面形状を円状以外の形状とすることは当然可能である。

【0110】

また、以上に説明した第1～第5の実施形態について、受光素子の部分だけを説明してきたが、これに加えてトランジスタ等をモノシリックに同一基板上に集積した光電子集積回路、いわゆるOEICに適用することもできる。

【0111】

また、シリコン系のフォトダイオードについて説明してきたが、その他、化合物半導体材料に適用することも可能である。更に、PIN型の受光素子には限らず、アバランシェフォトダイオード等のその他の受光素子に用いることも可能である。

【産業上の利用可能性】

【0112】

本発明の受光素子は、高感度と高速応答とを両立すると共に、短波長の入射光にも対応し、光ピックアップ装置に用いられる受光素子、光通信素子に用いる受光素子等として有用である。

【図面の簡単な説明】

【0113】

【図1】図1（a）及び（b）は、本発明の第1の実施形態に係る受光素子20の断面図及び平面図である。

【図 2】図 2 (a) ～ (f) は、受光素子 2 0 の製造工程を示す断面図である。

【図 3】図 3 (a) ～ (f) は、本発明の第 2 の実施形態に係る受光素子 2 0 a と、その製造工程を説明する図である。

【図 4】図 4 (a) ～ (f) は、本発明の第 3 の実施形態に係る受光素子 2 0 b と、その製造工程を説明する図である。

【図 5】図 5 (a) ～ (c) は、本発明の第 3 の実施形態に係る受光素子 2 0 c と、その製造工程を説明するための図である。

【図 6】図 6 (a) 及び (b) は、本発明の第 5 の実施形態に係る受光素子 2 0 d の断面図及び平面図である。

【符号の説明】

10

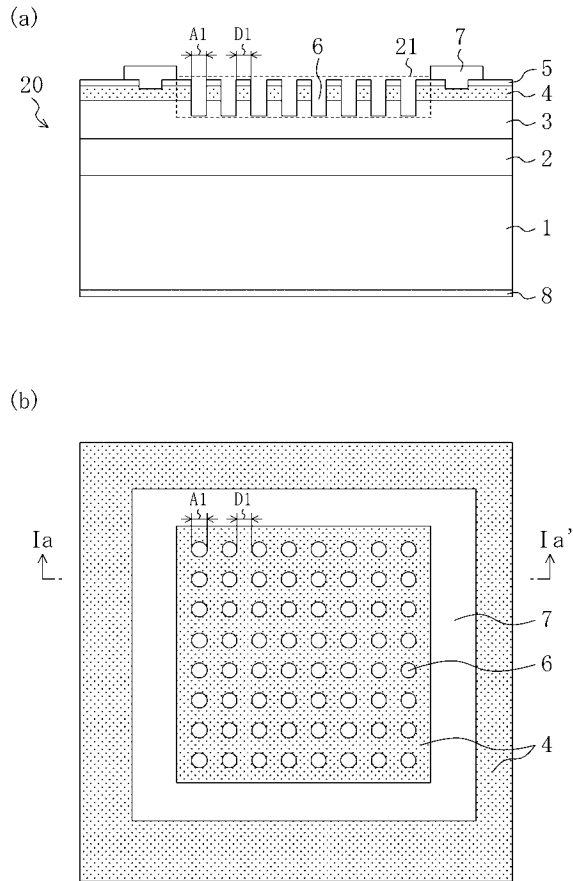
【 0 1 1 4 】

- 1 高濃度 P + 型シリコン基板
- 2 低濃度 P 型シリコン層
- 3 低濃度 N 型シリコン層
- 3 a 低屈折率部
- 4 高濃度 N + 型シリコン層
- 4 a 型シリコン層
- 5 シリコン酸化膜
- 6、6 a 空洞部
- 7 カソード電極配線
- 8 アノード電極配線
- 9 S O G 層
- 9 a 低屈折率部
- 1 0 S i N 膜
- 1 0 a 低屈折率部
- 1 0 b S i N 膜
- 1 1 フォトレジスト
- 2 0 受光素子
- 2 0 a 受光素子
- 2 0 b 受光素子
- 2 0 c 受光素子
- 2 0 d 受光素子
- 2 1 フォトニック結晶部

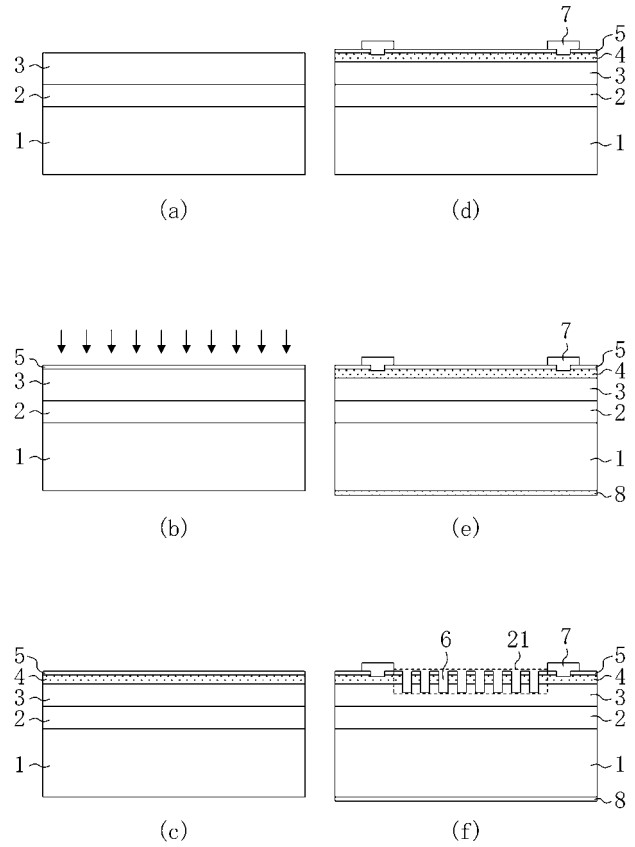
20

30

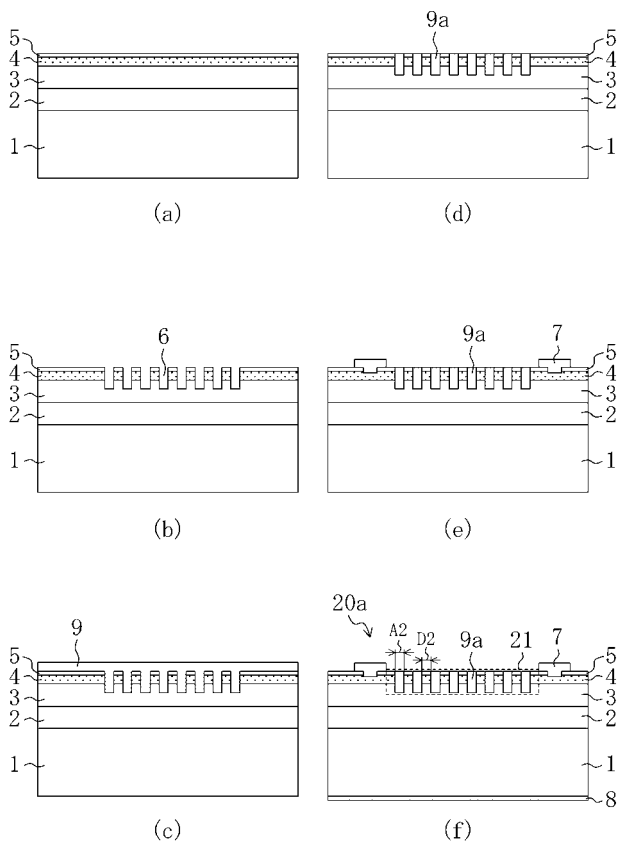
【図 1】



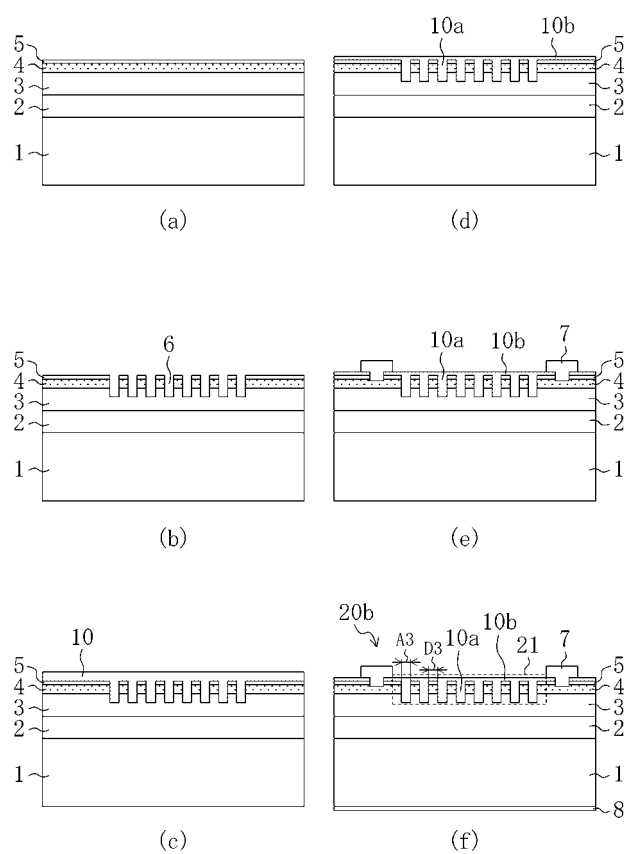
【図 2】



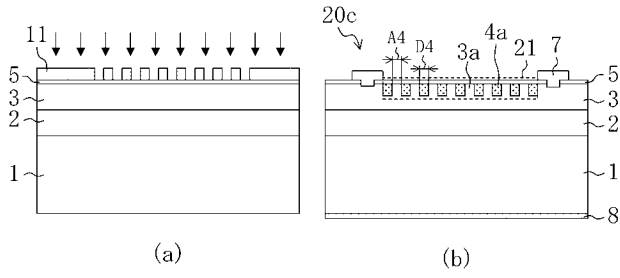
【図 3】



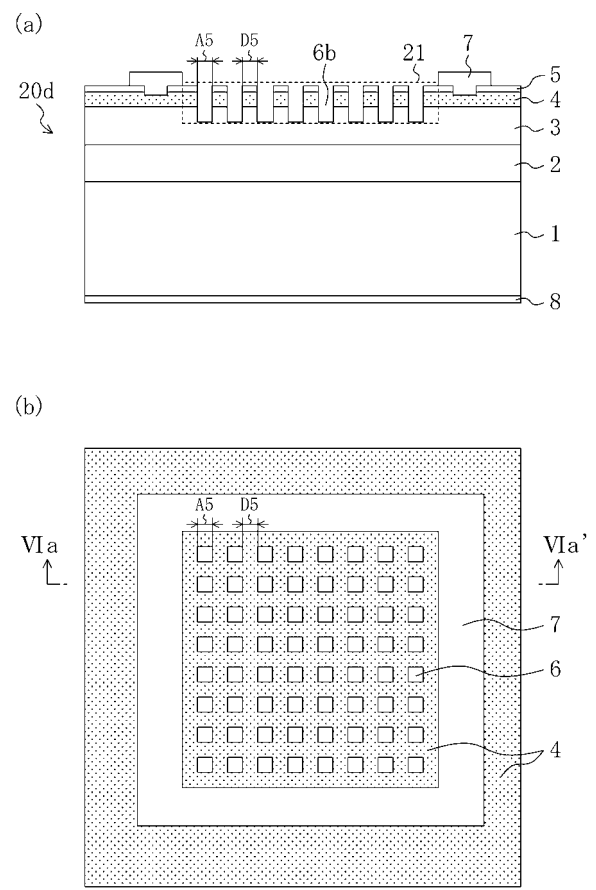
【図 4】



【図 5】



【図 6】



(b)

(c)

V1a

V1a'

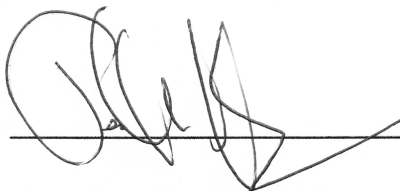
フロントページの続き

(74)代理人 100117581
弁理士 二宮 克也
(74)代理人 100117710
弁理士 原田 智雄
(74)代理人 100121728
弁理士 井関 勝守
(74)代理人 100124671
弁理士 関 啓
(74)代理人 100131060
弁理士 杉浦 靖也
(72)発明者 小原 直樹
大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内
(72)発明者 岩井 誉貴
大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内
(72)発明者 安川 久忠
大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内
(72)発明者 竹原 浩成
大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内
F ターム(参考) 5F049 MA04 MB03 NA01 NA03 NB08 SZ04 SZ20

I, Jonathan Christian Merz, declare as follows:

1. I am over 21 years of age and am competent to make this declaration.
2. I am a native speaker of English.
3. I am fluent in Japanese.
4. I have 15 years of experience translating Japanese to English.
5. I translated the attached patent document "JP2008311562A" from Japanese to English.
6. I certify that the above-mentioned the translation of the document "JP2008311562A" is, to the best of my knowledge, a true and accurate translation from Japanese to English.
7. In signing this declaration, I understand that the translation and this declaration may be filed as evidence in a contested case. I acknowledge that I may be subject to cross-examination within the United States.
8. I declare under penalty of perjury that all statements made herein are true and accurate to the best of my knowledge and belief, and that these statements were made with the knowledge that willful false statements and the like so made are punishable by fine or imprisonment, or both, under Section 1001 of Title 18 of the United States Code.

Executed: April 2, 2025

By: 
Jonathan Christian Merz