

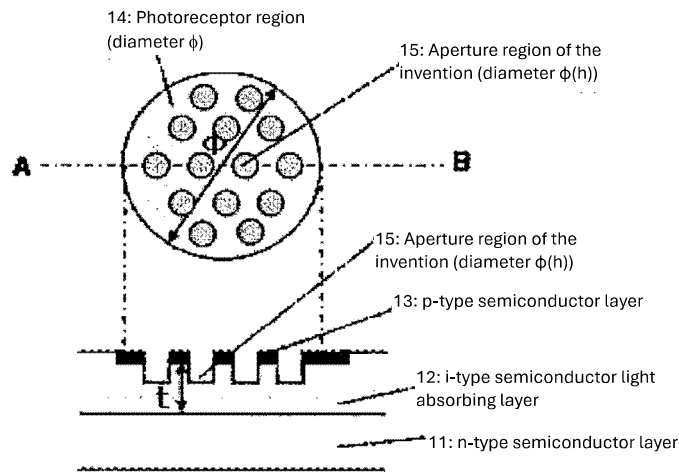
(19) [Issuing Country] Japan Patent Office (JP)
(12) [Publication type] Laid Open Patent Publication (A)
(11) [Publication No.] JP2007-165359 (P2007-165359A)
(43) [Laid Open Date] June 28, 2007 (2007.6.28)
(54) [Title of Invention] Semiconductor Photoreceptor Element
(51) [International Patent Classification]
H01 L 31/10 (2006.01)
[F I]
H01 L 31/10 A
[Request for Examination] Not Requested
[Number of Claims] 6
[Application Type] OL
[Total Pages] 13
(21) [Application No.] Patent Application No. 2005-355817 (P2005-355817)
(22) [Filing Date] December 9, 2005 (2005.12.9)
(71) [Applicant]
[ID No.] 000004237
[Name or Company Name] NEC Corporation
(74) [Agent]
[Identification No.] 100083839
[Patent Attorney]
[Name or Company Name] Yasuo ISHIKAWA
(74) [Agent]
[Identification No.] 100109139
[Patent Attorney]
[Name or Company Name] Takahiro IMAI
(72) [Inventor]
[Name] Kikuo MAKITA
[Theme Code (reference)]
5 F 049
[F-term (reference)]
5F049MA02
5F049MB07
5F049NA01
5F049NA03
5F049NB01
5F049NB07
5F049QA04

(57) [Abstract]

The present invention has the object of providing a semiconductor photoreceptor element whereby light is received with high efficiency and at high speed in devices for optical communications, optical information processing, optical measurement, and the like.

[Solution Means] Use of the semiconductor photoreceptor element of the present invention enables high speed response without a reduction in optical coupling efficiency. In the present invention, in a semiconductor photoreceptor element having an i-type light absorption layer and a p-type window layer structure, multiple aperture regions are formed, reaching from the p-type window layer to the i-type light absorption layer within the photoreceptor surface. This enables a reduction in the pn junction surface area, i.e., element capacitance, without reducing the photoreceptor surface area. Photocarriers generated in the aperture region are accelerated and travel by a tiny electric field, hence there is no significant degradation in efficiency due to surface recoupling, and desired high-speed characteristics can be obtained by designing the aperture width to take transit time into account.

[Selected Figure] Figure 1



A-B Cross Sectional Diagram

[Claims]

[Claim 1]

In a semiconductor photoreceptor element composed of a semiconductor light absorbing layer and a semiconductor layer stacked on a semiconductor substrate, the semiconductor light absorbing layer and the semiconductor layer have different conduction types, and have multiple aperture regions extending from the semiconductor layer to the semiconductor light absorbing layer.

[Claim 2]

In a semiconductor photoreceptor element composed of a semiconductor light absorbing layer and a semiconductor layer stacked on a semiconductor substrate, a semiconductor window layer with a different conduction type from the semiconductor layer is interposed between the semiconductor light absorption layer and the semiconductor layer, and there are multiple aperture regions extending from the semiconductor layer to the semiconductor window layer.

[Claim 3]

In the semiconductor photoreceptor element of Claim 1 or Claim 2, the aperture diameter of the aperture region varies within the surface of the photoreceptor region.

[Claim 4]

In the semiconductor photoreceptor element of any one of Claims 1-3, the aperture region has a circular, elliptical or polygonal shape.

[Claim 5]

The semiconductor photoreceptor element of Claim 1, whereby the semiconductor materials constituting the semiconductor absorption layer, the semiconductor layer and the semiconductor window layer in the semiconductor light absorbing element of any one of Claims 1-4 are: In, Al, Ga, As, P, N, Sb, Si, Ge, Hg, Cd, Te, Zn, S, O, Fe, Cu or Se.

[Claim 6]

An optical communication, optical information processing, or optical measurement device fitted with the semiconductor photoreceptor element of any one of Claims 1-5.

Detailed Description of the Invention

[Technical Field]

[0001]

The present invention pertains to a semiconductor photoreceptor element applied to devices for optical communications, optical information processing, or optical measurement, and more particularly to a semiconductor photoreceptor element for receiving light at high speed without reducing optical coupling efficiency.

2. Background Art

[0002]

Semiconductor photoreceptor elements are applied as photoelectric conversion elements in the fields of optical communications, optical information processing, optical measurement, and the like.

[0003]

In the optical communication wavelength bandwidth of 1 μm or above, lattice-matched InGaAsP systems on InP substrate predominate, while in the optical communication wavelength bandwidth of 1 μm or below used for optical information processing and data communication applications, lattice-matched AlGaAs systems on Si-type or GaAs-type substrates predominate.

[0004]

FIG. 11 shows the basic structure of a conventional surface-incident InGaAsP-type semiconductor photoreceptor element. A lattice-matched i-type InGaAs light absorption layer 112 and a p-type InP window layer 114 are formed on an InP substrate 111. Incident signal light is absorbed by a light absorption layer and converted into photocarriers (electron-hole pairs), which are then extracted by drift travel caused by an external electric field. Here the photoreceptor element high frequency bandwidth f_c is expressed by Equation 1, which accounts for carrier transit time and the CR circuit constant.

[Eq. 1]

$$f_c \approx \frac{1}{2 \pi \sqrt{\left[\frac{t}{v}\right]^2 + [C R]^2}}$$

[0005]

t is the thickness of the light absorption layer, v is the average velocity of the photocarriers, C is element capacitance, and R is load resistance. For this reason, increasing the speed requires a reduction in the light absorption layer thickness or capacitance. Generally, however, reducing the thickness of the light absorption layer means reducing the depletion thickness, which leads to an increase in capacitance and furthermore to a decrease in quantum efficiency. FIG. 12 shows a predicted high frequency bandwidth f_c versus the photoreceptor diameter (pn junction diameter) in a semiconductor photoreceptor element (corresponding to FIG. 11), with the thickness t of the i-type InGaAs light absorbing layer used as a parameter. Here the high frequency bandwidth deteriorates due to expansion of the photoreceptor diameter; at a photoreceptor diameter of 30 μm or less, the rate limiting factor is the optical carrier absorption layer transit time, whereas at 30 μm or above, the rate limiting factor is the CR constant. Thus reducing the photoreceptor diameter is sufficient for receiving high-speed optical signals, but in reality optical coupling with fiber or the like is insufficient, and coupling efficiency deteriorates. To expand the photoreceptor diameter requires finding a way to reduce the increase in junction capacitance that accompanies that expansion, while optimizing the thickness of the absorption layer.

[0006]

A metal Schottky metal (MSM) structure or selective diffusion structure (e.g., Patent Document 1) have been proposed as semiconductor photoreceptor elements for reducing element capacitance. FIG. 13 shows an MSM type semiconductor photoreceptor element, wherein a comb-shaped electrode region (photoreceptor region) 135 having a Schottky

junction is formed in an n-type InP substrate 131 and i-type InGaAs light absorbing layer 132 structure. Element capacitance is here determined by the Schottky junction and is therefore reduced, but since the comb-shaped electrode is exposed in the photoreceptor region, light is blocked in a surface incidence structure, raising the problem that sufficient optical coupling efficiency cannot be obtained. FIG. 14 shows the latter selective diffusion type semiconductor photoreceptor element. In an n(+)-type semiconductor layer 141, n-type semiconductor light absorbing layer 142 structure, the semiconductor photoreceptor element forms a p-type semiconductor light absorbing layer 143 by selective diffusion. In this structure, the pn junction surface area is reduced by partially forming a pn junction region by selective diffusion, which is expected to reduce capacitance; in reality, however, junction capacitance on the side portion of the diffusion becomes a problem and cannot be sufficiently reduced.

[Patent Document 1] [Japanese Unexamined Patent Publication No. 182274/1983](#)

[Disclosure of the Invention]

[Problem to be Solved by the Invention]

[0007]

Devices for optical communications, optical information processing, optical measurement, and the like require optimal semiconductor photoreceptor element design suited to high frequency bands, and optical coupling methods. In recent optical communication systems, in particular, multimode fiber (MMF) has begun to be adopted from a cost cutting perspective for optical transmission devices in the high speed region above 20 Gbps, and is being considered for optical transmission devices and even inter-rack optical transmission devices for super high speed computers. In such cases, a photoreceptor diameter of 50 μm or above is required to obtain optical coupling with a wide propagation beam diameter MMF, but the photoreceptor diameter limit is 30 μm from the high frequency (20 Gbps) bandwidth, making it impossible to achieve both optical coupling efficiency and bandwidth. Reducing element capacitance and expanding the photoreceptor diameter are important for attaining sufficient performance in MMF applications. In optical pickups for DVDs and the like, an IC amplifier with high input

resistance (up to several kilo-Ohms) is connected to a subsequent stage of a semiconductor photoreceptor element (Si type) to increase photoelectric conversion efficiency (V/W). This means an excessive reduction of the semiconductor photoreceptor capacitance is required to obtain the high frequency bandwidth of several hundred MHz required by the system. Hence high-performance semiconductor photoreceptor elements with reduced element capacitance are in demand for devices for optical communications, optical information processing, optical measurement, and the like.

[Means for Solving the Problem]

[0008]

To solve the problem above, the semiconductor photoreceptor element of Claim 1 of the invention is a semiconductor photoreceptor element formed by stacking a semiconductor light-absorbing layer and a semiconductor layer on a semiconductor substrate, wherein the semiconductor light-absorbing layer and the semiconductor layer have different conductive types, and there are also multiple aperture regions reaching from one semiconductor layer to another semiconductor layer.

[0009]

In a semiconductor photoreceptor element formed by stacking a semiconductor light-absorbing layer and a semiconductor layer on a semiconductor substrate, the semiconductor photoreceptor element according to Claim 2 of the invention interposes a semiconductor window layer of a different conductivity type from the semiconductor layer between the semiconductor light-absorbing layer and the semiconductor layer, and has multiple aperture regions extending from the semiconductor layer to the semiconductor window layer.

[0010]

The semiconductor photoreceptor element of Embodiment 3 of the invention, whereby in the semiconductor photoreceptor element of Claims 1 or 2, the aperture diameter in the aperture region varies within the photoreceptor region surface.

[0011]

A semiconductor photoreceptor element according to Embodiment 4 of the

invention is the semiconductor photoreceptor element of any one of Claims 1-3, wherein the aperture region may be circular, elliptical, or polygonal in shape.

[0012]

The semiconductor photoreceptor element according to Claim 5 of the invention is the semiconductor photoreceptor element of any one of Claims 1 to 4, wherein the semiconductor materials constituting the semiconductor absorption layer, the semiconductor layer and the semiconductor window layer are: In, Al, Ga, As, P, N, Sb, Si, Ge, Hg, Cd, Te, Zn, S, O, Fe, Cu or Se.

[0013]

The optical communications, optical information processing, and optical measurement instrument of Claim 6, fitted with the semiconductor photoreceptor of any one of Claims 1 through 5.

[Effect of the Invention]

[0014]

Using the semiconductor photoreceptor element of the invention, light can be received over a wide bandwidth without loss in couplings with multimode fiber or the like in optical communication devices or the like [operating] above 10Gbps. In optical information processing such as for DVDs, as well, a response of several hundred MHz is possible without reducing the photoreceptor surface area on a Si-based PD. That is because effective pn junction surface area, and thus capacitance, is reduced by the provision of multiple aperture regions across the pn junction within the photoreceptor surface.

[0015]

Moreover, light can be received at a high efficiency. This is because the influence of surface recoupling and the like can be reduced by disposing a semiconductor window layer directly below the aperture region.

[0016]

Furthermore, response characteristics relative to high input optical signals are improved. That is because electric field drop effect can be reduced by changing the aperture region width within the photoreceptor surface according to optical signal intensity

distribution.

[0017]

The invention above was described based on a PIN type structure in which the surface is a p-layer, but the inventive thinking can also be applied to an inverted structure [thereof], an NIP type structure with an n-layer on the surface. While the shape of the aperture region is shown as a circle, other shapes such as an ellipse and a polygon may also be used. A semiconductor photoreceptor element receives light efficiently and at high speed can thus be achieved.

[Best Mode to Practice the Invention]

[0018]

A semiconductor photoreceptor element according to an embodiment of the present invention is described in detail with reference to drawings.

(Embodiment 1)

FIG. 1 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to the first embodiment. The semiconductor photoreceptor element of this embodiment has an n-type semiconductor substrate layer (semiconductor substrate layer) 11 and an i-type and p-type semiconductor layer (semiconductor layer) 13, stacked in that order. Here multiple aperture regions 15, a feature of the invention, are formed within the surface of photoreceptor region 14. Aperture area 15 is formed by chemical etching or the like, and penetrates from p-type semiconductor layer 13 through to i-type semiconductor light absorbing layer 12. This reduces the effective pn junction area, leading to a reduction in capacitance. In the conventional structure described above (FIG. 14), junctions caused by lateral depletion are non-negligible, and reduction in capacitance [there] is insufficient, but the above-described excess capacitance does not exist, because the pn junction is exposed in the structure of the invention.

[0019]

FIG. 2 is a diagram showing a calculated prediction of high frequency bandwidth f_c when multiple aperture regions 15 are provided in which the diameter of aperture region 15 (aperture diameter) $\Phi(h)$ is $1\ \mu\text{m}$ relative to the diameter of photoreceptor region

(photoreceptor diameter) Φ (the number of aperture regions increases as the photoreceptor diameter increases).

[0020]

In the figure, a conventional structure (a device with no aperture regions present) is compared with the structure of the invention. Here, the thickness (i-absorption layer thickness) t of the i-semiconductor light absorption layer is set to 1.0 μm . With a photoreceptor diameter of 50 μm , capable of multimode fiber coupling, the high frequency bandwidth will therefore be 15 GHz due to lowered capacitance, so a 50% increase is predicted compared to a conventional structure. This is a high frequency bandwidth capable of receiving a 20 Gbps signal light. In the structure of the present invention, photocarriers generated at the bottom of aperture region 15 drift due to the slight electric field, reaching high concentration region[s]. The aperture diameter Φ (h) thus affects the high frequency bandwidth as transit time. I.e., aperture diameter Φ (h) should be optimized to fit the target bandwidth (band). FIG. 3 shows the aperture diameter Φ (h) limit for a target bandwidth inferred from drift transit time. Thus for a desired bandwidth of 20 GHz, for example, the aperture diameter Φ (h) limit is 3 μm .

(2nd Embodiment)

FIG. 4 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a second embodiment.

[0021]

The semiconductor photoreceptor element of this embodiment has a structure in which an i-type semiconductor light absorbing layer (semiconductor light absorbing layer) 42 and a p-type semiconductor layer (semiconductor layer) 43 are laminated in that order onto an n-type semiconductor layer (semiconductor substrate layer) 41. Here, an i-type semiconductor window layer (semiconductor window layer) 46, which is a feature of the invention, is inserted between i-type semiconductor light absorption layer 42 and p-type semiconductor layer 43, and multiple aperture regions 45 are formed within the photoreceptor region 44 surface. Aperture region 44 penetrates from p-type semiconductor layer 43 through i-type semiconductor window layer 46. Here i-type semiconductor

window layer 46 is a semiconductor layer with a bandwidth gap larger than the signal light energy, and has a window layer effect.

[0022]

I.e., in the structure of the invention shown in FIG. 1, the i-type semiconductor light absorbing layer is exposed in aperture region 45, raising a concern that efficiency will degrade due to surface recoupling. In FIG. 4, the influence of surface recoupling described above can be eliminated by covering aperture region 44 with a window layer. Here, the capacitance reducing effect of aperture region 44 and a determination of the aperture diameter are based on the same concept as in FIG. 1

(3rd Embodiment)

FIG. 5 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a third embodiment.

[0023]

The semiconductor photoreceptor element of this embodiment has a structure in which an i-type semiconductor light absorbing layer (semiconductor light absorbing layer) 52, an i-type semiconductor window layer (semiconductor window layer) 56, and a p-type semiconductor layer 53 are laminated in that order on an n-type semiconductor layer (semiconductor substrate layer) 51. Here multiple aperture regions 55 are formed within the photoreceptor region 54 surface, and aperture region 55 penetrates from the p-type semiconductor layer 53 through to the i-type semiconductor window layer 56. In the present invention the diameter of aperture region 55 (aperture diameter) varies within the photoreceptor region surface 54. I.e., the aperture diameter $\Phi(h)$ is small at the center of the photoreceptor region and large at the edge of the photoreceptor region. This is because the intensity distribution 57 of the input signal light is normally a Gaussian distribution, and light intensity is high at the center of photoreceptor area 54. If high-power input light exceeding [a] mW is incident thereon, a large number of photocarriers are generated just beneath the aperture region 55 at the center of the photoreceptor region 54, which can be predicted to weaken the electric field [in] the light absorbing layer. This is generally referred to as the electric field drop phenomenon, and leads to degradation of the high frequency

band. The present invention has the object of reducing the aperture diameter 55 at the center of photoreceptor region 54 where the light intensity is strong, mitigating the electric field drop by compensating the sufficient electric field directly beneath the pn junction, thereby improving characteristics relative to high input light.

[0024]

In realizing the structure of the semiconductor photoreceptor element of the invention, the semiconductor materials of the semiconductor photoreceptor element used in devices for optical communication, optical information processing, optical measurement, etc. are limited to In, Al, Ga, As, P, N, Sb, Si, Ge, Hg, Cd, Te, Zn, S, O, Fe, Cu, Se, and the like. Incorporating the semiconductor photoreceptor element of the invention into devices for optical communication, optical information processing, optical measurement, etc. enables higher performance to be achieved.

[Examples]

[0025]

Below we describe examples of the present invention in detail, referring to drawings.

(Example 1)

Below, referring to FIG. 6, we describe a first example of a semiconductor photoreceptor element according to the invention. FIG. 6 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a first example.

[0026]

The structure and operating principle of the semiconductor photoreceptor element of the first example are based on FIG. 1. A lattice-matched i-type InGaAs light absorption layer (semiconductor light absorption layer) 62 (layer thickness 1 μm) and a p-type InP window layer (semiconductor window layer) 64 (layer thickness 0.5 μm) are formed on an n-type InP substrate (semiconductor substrate) 61. Photoreceptor area 69 is intended for multimode fiber coupling, and has a diameter (photoreceptor diameter) Φ of 50 μm . Multiple aperture regions 68, which are a feature of the invention, are formed within the photoreceptor region surface. Here aperture region 68 has an aperture diameter of 3 μm and a depth of 0.7 μm , achieved by wet etching (dry etching is also possible), intended for

applications at 20 Gbps. Optical coupling efficiency had been 60%, and the high frequency bandwidth was 8 GHz in the conventional structure (without an aperture region), but with this invention that is increased to 16 GHz, and 20 Gbps signal light can be received at high efficiency. The reason for this performance improvement is that capacitance can be substantially reduced through a reduction in pn coupling surface area, which leads to higher speeds. 20 Gbps signal light can thus be received even in multimode fiber couplings.

[0027]

In this example [the invention] is applied to a p-type InP window layer, i-type InGaAs light absorption layer structure, but the same effect can be achieved with an n-type InP window layer, i-type InGaAs light absorption layer structure.

(Example 2)

Below, referring to FIG. 7, we explain a second example of a semiconductor photoreceptor element according to the invention. FIG. 7 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a second example.

[0028]

The structure and principle of the semiconductor photoreceptor element of the second example are based on FIG. 4. A lattice-matched i-type InGaAs light absorption layer (semiconductor light absorption layer) 72 (layer thickness 1 μm) and a p-type InP window layer (semiconductor window layer) 74 (layer thickness 0.5 μm) are formed on an n-type InP substrate (semiconductor substrate) 71; in addition an i-type InP window layer 710 (layer thickness 0.2 μm), which is a feature of the present invention, is inserted between i-type InGaAs light absorption layer 72 and p-type InP window layer 74. The photoreceptor area is intended for multimode fiber coupling, and has a diameter (photoreceptor diameter) Φ of 50 μm . Multiple aperture regions 78, which are a feature of the present invention, are formed within the photoreceptor region surface. Here aperture region 78, intended for 20 Gbps application, has a diameter (aperture diameter) of 3 μm and a depth of 0.9 μm by wet etching (dry etching is also possible). Optical coupling efficiency is thereby increased to 70%; the high frequency band, which in the conventional

structure was 8 GHz, is increased up to 16 GHz in the invention, enabling efficient receiving of 20 Gbps signal light. The factors behind this improvement are that the application of the aperture region of the invention reduces the effective pn junction surface area, thereby reducing capacitance and leading to higher speeds, and further that the interposition of i-type InP window layer 710 reduces the effects of surface recoupling, improving efficiency. This enables high efficiency reception of 20 Gbps signal light notwithstanding the multimode fiber coupling.

[0029]

In this example the invention is applied to a p-type InP window layer, an i-type InP window layer, and an i-type InGaAs light absorption layer structure, but similar effects can be obtained with an n-type InP window layer, i-type InP window layer, and i-type InGaAs light absorption layer structure.

(Example 3)

Below, referring to FIG. 8, we explain a semiconductor photoreceptor element according to a third example of the present invention. FIG. 8 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to the third example.

[0030]

The structure and principle of the semiconductor photoreceptor element of the third example are based on FIG. 5. A lattice-matched i-type InGaAs light absorption layer (semiconductor light absorption layer) 82 (layer thickness 1 μm), an i-type InP window layer (semiconductor window layer) 810 (layer thickness 0.2 μm), and a p-type InP window layer 84 (layer thickness 0.5 μm) are formed on an n-type InP substrate (semiconductor substrate) 81. Photoreceptor region 89 is intended for multimode fiber coupling, and has a diameter (photoreceptor diameter) Φ of 50 μm . Formed within the photoreceptor area surface are multiple aperture regions 88, wherein the aperture diameter varies within the photoreceptor surface, a feature of the present invention. To minimize bandwidth degradation during a 20 Gbps high optical input, the aperture diameter gradually increases from 1 μm at the center of the photoreceptor area to 3 μm at the edge of the photoreceptor area. The depth was set to 0.9 μm by wet etching (dry etching is also possible). As a result,

optical coupling efficiency was 70%, and the high frequency bandwidth was increased from 8 GHz with the conventional structure (structure with no aperture region) to 15 GHz in the structure of the present invention, enabling high efficiency reception of 20 Gbps signal light. No remarkable bandwidth degradation was observed with this structure, even when a +3 dB high input light was input. Factors behind this performance improvement are: reduced capacitance achieved through substantially reduced pn surface area by the application of aperture region 88 of the invention, which led to faster speed; the reduced effect of surface recoupling by interposing i-type InP window layer 810; and also the fact that bandwidth degradation caused by electric field drop could be suppressed by changing the aperture diameter of aperture region 88 according to light intensity distribution. As a result, even though it is coupled with multimode fiber, it is possible to receive 20 Gbps signal light with high efficiency, and also achieve excellent high optical input characteristics.

[0031]

In this example [the invention] is applied to a p-type InP window layer, i-type InP window layer, and i-type InGaAs light absorption layer structure, but similar effects can be obtained with an n-type InP window layer, i-type InP window layer, and i-type InGaAs light absorption layer structure.

(Example 4)

Below, referring to FIG. 9, we explain Example 4 of the semiconductor photoreceptor element of the invention. FIG. 9 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to the fourth example.

[0032]

The structure and principle of the semiconductor photoreceptor element of the fourth example are based on FIG. 1. A p-type Si layer 91, i-type Si light absorbing layer (semiconductor light absorbing layer) 92 (layer thickness 10 μm), and n-type Si layer 94 (layer thickness 0.5 μm) are formed on a Si substrate. The photoreceptor area is divided into four parts to accommodate a DVD pickup system (100 MHz bandwidth); each photoreceptor area is a 40 μm square. Multiple aperture regions 98, a feature of the

invention, are formed within the photoreceptor region surface. Here an amplifier IC having a 10 k Ω input resistance is connected to the rear stage of the photoreceptor element of the invention. The element capacitance required from the photoreceptor element to obtain a bandwidth of 100 MHz is therefore 150 fF or less. In this example, the aperture region 98 is a 2 μ m square, and the p-type Si layer 91 is formed with a 1 μ m width. The depth was formed to 0.7 μ m by dry etching. Thus, element capacitance was 200 fF in the conventional structure (without an aperture region), but is lowered down to 130 fF in the structure of the present invention. [The system] can thus be driven at 100 MHz. This performance improvement results from a reduction in capacitance through a substantial reduction in pn coupling surface area by application of the aperture region of the invention.

[0033]

In this example, [the invention] is applied to an n-type Si layer, i-type Si light absorbing layer, p-type Si layer structure, but the same effect can be obtained with a p-type Si layer, i-type Si light absorbing layer, and n-type Si layer structure.

(Example 5)

Below, referring to FIG. 10, we explain Example 5 of a semiconductor photoreceptor element according to the invention. FIG. 10 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to the fifth example. The present example seeks to apply [the invention] to an avalanche multiplication-type semiconductor photoreceptor element with an internal gain effect.

[0034]

The structure and principle of the semiconductor photoreceptor element of the fifth example are based on FIG. 5. A lattice-matched i-type InGaAs light absorption layer (semiconductor absorption layer) 102 (layer thickness 1 μ m), i-type InP window layer (semiconductor window layer) 1010 (layer thickness 0.2 μ m), and p-type InP window 104 (layer thickness 0.5 μ m) are formed on an n-type InP substrate (semiconductor substrate) 101; in addition, an i-type InAlAs multiplication layer 1012 and a p-type InAlAs electric field relaxation layer 1011 are added directly below the InGaAs light absorption layer 102. The diameter of the photoreceptor region is $\Phi=50$ μ m, which is intended for multimode fiber

coupling. Multiple aperture regions 108, which are a feature of the invention, are formed within the photoreceptor area surface. Here, to satisfy the performance requirements for 20 Gbps and high optical input, the aperture diameter of aperture region 108 is 1 μm at the center of the photoreceptor region and gradually increases to 3 μm at the edge of the photoreceptor region. The depth was set to 0.9 μm by wet etching (dry etching is also possible). As a result, optical coupling efficiency was 70%, and high frequency bandwidth was 8 GHz at a multiplication factor of approximately 2 in the conventional structure (structure without an aperture region), but in the structure of the invention this was increased to 15 GHz, enabling reception of 20 Gbps signal light at a high efficiency. Also, no notable bandwidth degradation was observed even under a +0 dBm high input light. Factors behind this performance improvement are: reduced capacitance achieved through substantially reduced pn surface area by the application of aperture region 108 of the invention, which led to faster speed; the reduced effect of surface recoupling by interposing i-type InP window layer 1010; and also the fact that bandwidth degradation caused by electric field drop could be suppressed by changing the aperture diameter of aperture region 108 according to light intensity distribution. As a result, an avalanche multiplication type semiconductor photoreceptor has been realized that can receive 20 Gbps signal light with high efficiency even when coupled with multimode fiber, and also has excellent high optical input characteristics.

[0035]

As described above, the invention enables realization of a semiconductor photoreceptor element with which light can be received at high speeds without reducing optical coupling efficiency. Also, high performance can be achieved by incorporating the semiconductor photoreceptor element achieved by the invention into optical communications, optical information processing, and optical measurement devices.

[Brief Description of Drawings]

[0036]

FIG. 1 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a first embodiment.

FIG. 2 is the high frequency bandwidth (dependence on photoreceptor diameter) of the semiconductor photoreceptor according to the present invention.

FIG. 3 shows the diameter limit of the aperture region of the semiconductor photoreceptor element according to the present invention.

FIG. 4 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a second embodiment.

FIG. 5 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a third embodiment.

FIG. 6 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a first example.

FIG. 7 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a second example.

FIG. 8 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a third example.

FIG. 9 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a fourth example.

FIG. 10 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element according to a fifth example.

FIG. 11 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element having a conventional structure.

FIG. 12 shows the high frequency bandwidth (dependence on photoreceptor diameter) of a semiconductor photoreceptor having a conventional structure.

FIG. 13 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element having a conventional structure (metal Schottky metal type).

FIG. 14 is a structural diagram of a semiconductor photoreceptor element having a conventional structure (selective diffusion type).

[Explanation of Reference Numerals]

[0037]

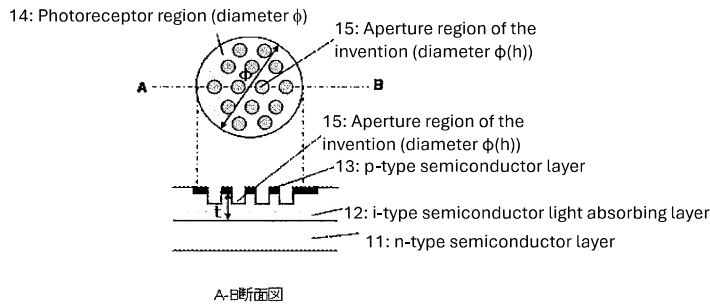
11 n-type semiconductor layer

12 i-type semiconductor light absorbing layer
13 p-type semiconductor layer
14 photoreceptor area (diameter Φ)
15 aperture area according to the present invention (diameter $\Phi(h)$)
41 n-type semiconductor layer
42 i-type semiconductor light absorbing layer
43 p-type semiconductor layer
44 photoreceptor area (diameter Φ)
45 aperture area according to the present invention (diameter $\Phi(h)$)
46 i-type semiconductor window layer according to the present invention
51 n-type semiconductor layer
52 i-type semiconductor light absorbing layer
53 p-type semiconductor layer
54 photoreceptor area (diameter Φ)
55 aperture region according to the present invention (aperture diameter $\Phi(h)$ varies)
56 i-type semiconductor window layer according to the present invention
57 light intensity distribution of input signal light
61 n-type InP substrate
62 i-type InGaAs light absorption layer
63 n-type InP layer
64 p-type InP window layer
65 SiN film
66 p-type electrode
67 n-type electrode
68 aperture region (diameter $\Phi(h)$)
69 photoreceptor area
71 n-type InP substrate
72 i-type InGaAs light absorption layer
73 n-type InP layer

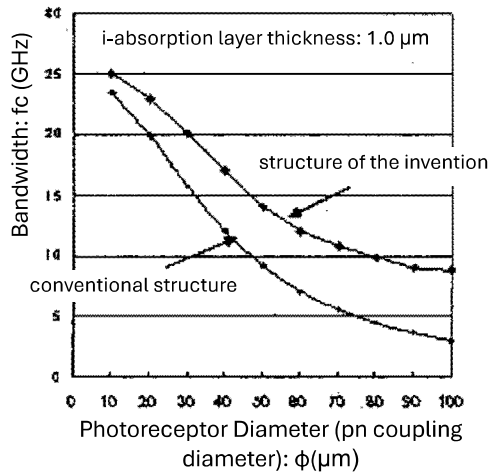
74 p-type InP window layer
75 SiN film
76 p-type electrode
77 n-type electrode
78 aperture region (diameter Φ (h))
79 photoreceptor area
710 i-type InP window layer
81 n-type InP substrate
82 i-type InGaAs light absorption layer
83 n-type InP layer
84 p-type InP window layer
85 SiN film
86 p-type electrode
87 n-type electrode
88 aperture region (aperture diameter Φ (h) changes)
89 photoreceptor area
1810 i-type InP window layer
91 p-type Si layer
92 i-type Si light absorbing layer
94 n-type Si layer
95 SiN film
96 n-type electrode
98 aperture region
99 photoreceptor area (4 divisions)
101 n-type InP substrate
102 i-type InGaAs light absorption layer
103 n-type InP
104 p-type InP window layer
105 SiN film

106 p-type electrode
107 n-type electrode
108 aperture region (aperture diameter Φ (h) changes)
109 photoreceptor area
1010 i-type InP window layer
1011 p-type InAlAs field relaxation layer
1012 i-type InAlAs multiplication layer
111 n-type InP substrate
112 i-type InGaAs light absorption layer
113 n-type InP
114 p-type InP window layer
115 SiN film
116 p-type electrode
117 n-type electrode
119 photoreceptor area
131 n-type InP substrate
132 i-type InGaAs light absorption layer
133 extraction electrode 1
134 extraction electrode 2
135 comb-shaped electrode area (photoreceptor area)
141 n(+)-type semiconductor layer
142 n-type semiconductor light absorbing layer
143 p-type semiconductor light absorbing layer (diffusion region)
144 n-type semiconductor light absorbing layer (non-diffusion region)
145 photoreceptor area

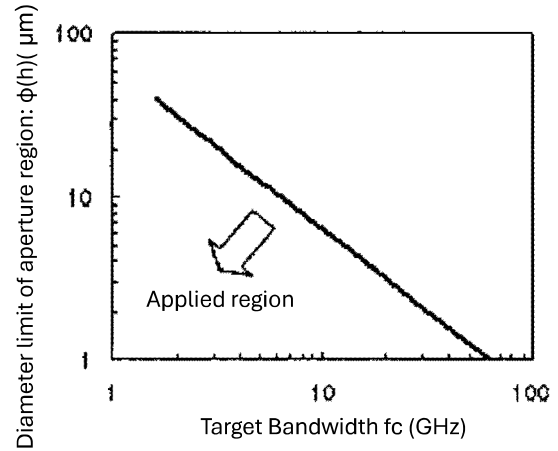
[FIG. 1]



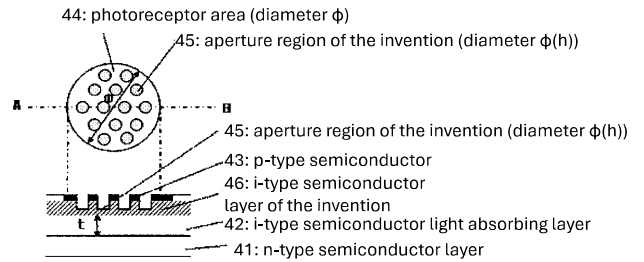
[FIG. 2]



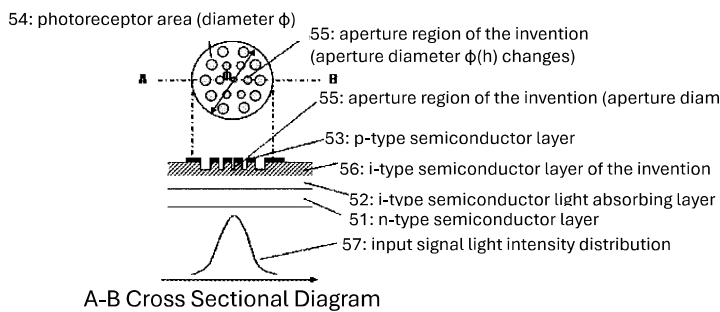
[FIG. 3]



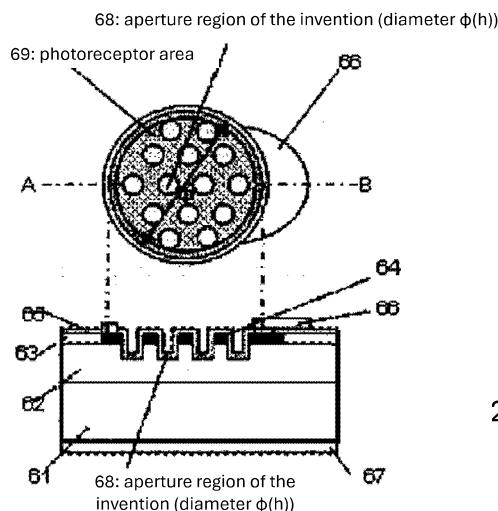
[FIG. 4]



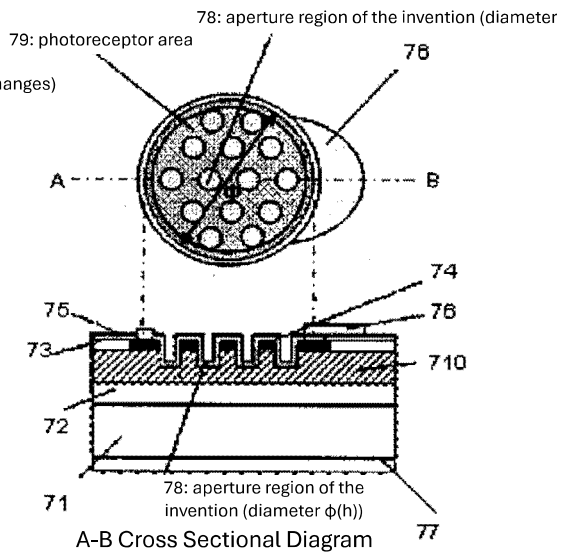
[FIG. 5]



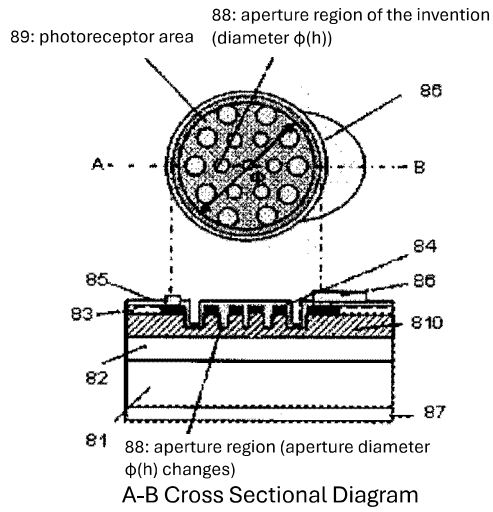
[FIG. 6]



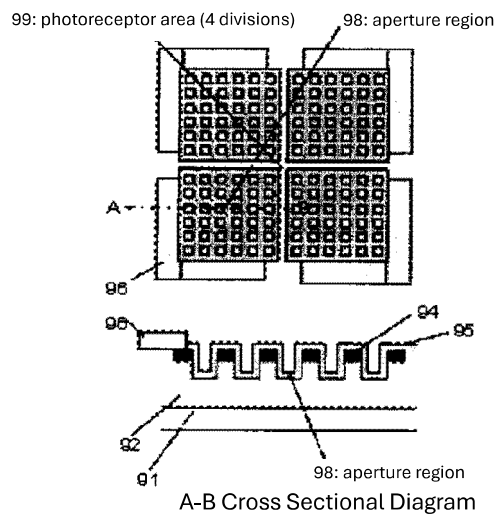
[FIG. 7]



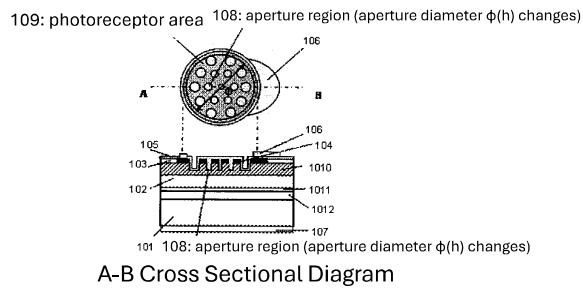
[FIG. 8]



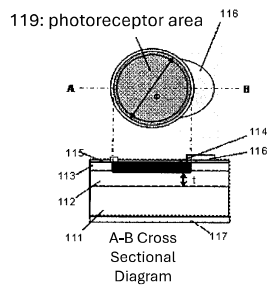
[FIG. 9]



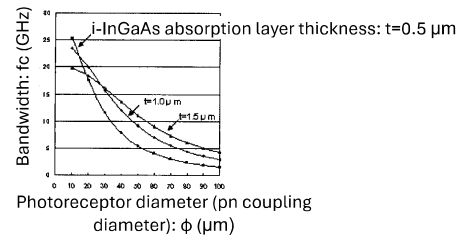
[FIG. 10]



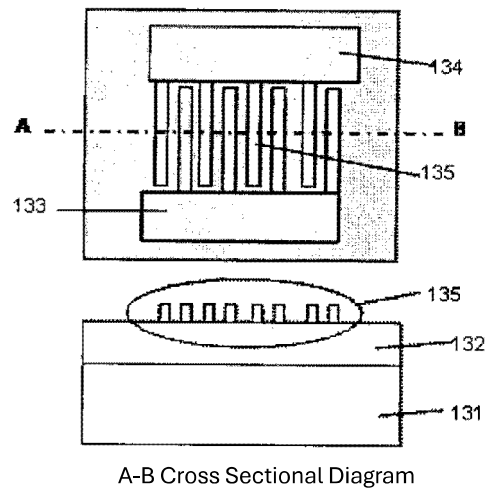
[FIG. 11]



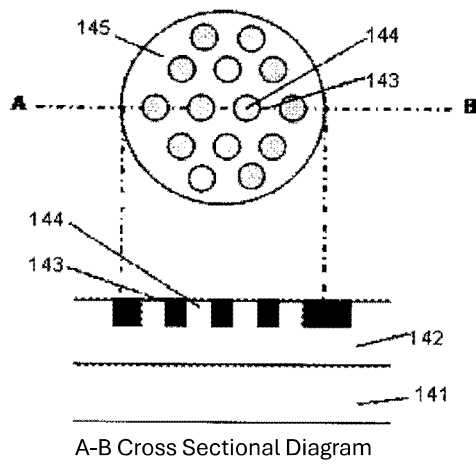
[FIG. 12]



[FIG. 13]



[FIG. 13]



(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2007-165359

(P2007-165359A)

(43) 公開日 平成19年6月28日(2007.6.28)

(51) Int. Cl.

H01L 31/10 (2006.01)

F I

H01L 31/10

A

テーマコード (参考)

5F049

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2005-355817 (P2005-355817)

(22) 出願日 平成17年12月9日 (2005.12.9)

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(74) 代理人 100083839

弁理士 石川 泰男

(74) 代理人 100109139

弁理士 今井 孝弘

(72) 発明者 牧田 紀久夫

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社社内

Fターム(参考) 5F049 MA02 MB07 NA01 NA03 NB01

NB07 QA04 QA20

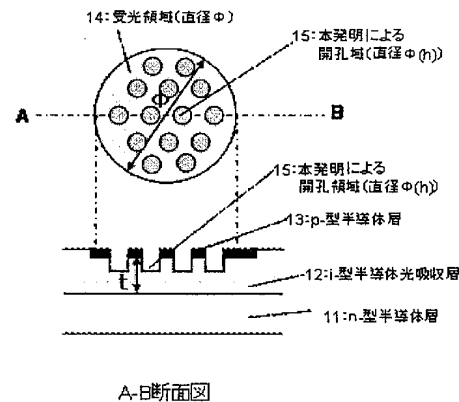
(54) 【発明の名称】 半導体受光素子

(57) 【要約】

【課題】 光通信、光情報処理、光計測等の装置において、高効率・高速で受光することを特徴とする、半導体受光素子を提供することを目的とする。

【解決手段】 本発明の半導体受光素子を用いれば、光結合効率を低減することなく、高速応答が可能となる。本発明では、i ー型光吸収層、p ー型窓層の構造を有する半導体受光素子において、受光面内にp 型窓層から i ー型光吸収層に達する開孔領域を、複数個設けることを特徴とする。これより、受光面積を低減することなく、pn 接合面積すなわち素子容量の低減が可能となる。開孔領域で発生した光キャリアは、微小な電界に加速され走行するため表面再結合による顕著な効率劣化がなく、また走行時間を考慮して開孔幅を設計することにより所望の高速特性も得られる。

【選択図】 図1



A-B断面図

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

半導体基板上に、半導体光吸収層及び半導体層を積層してなる半導体受光素子において、
前記半導体光吸収層と前記半導体層とは異なる伝導型を有し、かつ前記半導体層から前記半導体光吸収層に達する開孔領域を複数個有することを特徴とする半導体受光素子。

【請求項 2】

半導体基板上に、半導体光吸収層及び半導体層を積層してなる半導体受光素子において、
前記半導体光吸収層と前記半導体層との間に、前記半導体層と異なる伝導型を有する半導体窓層を介在させ、かつ前記半導体層から前記半導体層窓層に達する前記開孔領域を複数個有することを特徴とする半導体受光素子。

10

【請求項 3】

請求項 1 又は請求項 2 に記載の半導体受光素子において、
前記開孔領域の開孔直径が、受光領域面内で変化することを特徴とする半導体受光素子。

【請求項 4】

請求項 1 乃至請求項 3 のいずれか一項に記載の半導体受光素子において、前記開孔領域は、円形型、楕円形型、多角形型の形状であることを特徴とする半導体受光素子。

【請求項 5】

請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか一項に記載の半導体受光素子において、前記半導体吸収層、前記半導体層及び前記半導体窓層を構成する半導体材料が、In、Al、Ga、As、P、N、Sb、Si、Ge、Hg、Cd、Te、Zn、S、O、Fe、Cu、Seであることを特徴とする半導体受光素子。

20

【請求項 6】

請求項 1 乃至請求項 5 のいずれか一項に記載の半導体受光素子を搭載することを特徴とする光通信、光情報処理及び光計測装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光通信、光情報処理、光計測等の装置に適用する半導体受光素子に関するものであり、更に詳細には、光結合効率を低減することなく高速に受光することを特徴とする半導体受光素子に関する。

30

【背景技術】

【0002】

光通信、光情報処理、光計測等の分野において、光電変換素子として半導体受光素子が適用されている。

【0003】

1 μm 以上の光通信波長帯では InP 基板上に格子整合した InGaAsP 系が、又光情報処理、データ通信用途である 1 μm 以下の光通信波長帯では Si 系あるいは GaAs 基板上に格子整合した AlGaAs 系等が主要である。

40

【0004】

図 11 には、従来構造である面入射型の InGaAsP 系半導体受光素子の基本構造を示す。InP 基板 111 上に、格子整合した i ー型 InGaAs 光吸収層 112 及び p ー型 InP 窓層 114 が形成されている。入射した信号光は、光吸収層で吸収され光キャリア（電子・正孔対）に変換され、外部電界によりドリフト走行で取り出される。ここで、受光素子の高周波帯域 f_c は、キャリアの走行時間と CR 回路定数を考慮した数式 1 で示される。

【数 1】

$$f_c \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{\left[\frac{t}{v}\right]^2 + [CR]^2}}$$

【0005】

t は光吸収層厚、v は光キャリアの平均速度、C は素子容量、R は負荷抵抗である。これより、高速化のためには光吸収層厚の低減あるいは容量低減が必要となる。しかしながら、一般には光吸収層厚を低減することは、空乏厚の低減を意味するために容量増大を招くこと、さらには量子効率の低下につながる。図 1 2 には、半導体受光素子（図 1 1 に対応）の受光直径（pn 接合直径）に対する高周波帯域 f_c を予測したもので、i ー型 InGaAs 光吸収層厚 t をパラメータとしている。ここで、受光直径の拡大により高周波帯域は劣化するが、受光直径が $30\mu\text{m}$ 以下では光キャリアの吸収層走行する時間が、受光直径が $30\mu\text{m}$ 以上では CR 定数が律速要因となっている。これより、高速光信号を受光するには受光直径を低減すれば良いが、実際にはファイバー等との光結合が不十分となり結合効率が劣化する。受光直径を拡大するには、吸収層厚の最適化のもと、拡大に伴う接合容量の増大を低減する工夫が必要となる。

10

【0006】

素子容量の低減を目的とした半導体受光素子としては、メタルショットキーメタル（MSM）型構造あるいは選択拡散型構造（例えば、特許文献 1）がこれまでに提案されている。図 1 3 に MSM 型半導体受光素子を示すが、n ー型 InP 基板 1 3 1、i ー型 InGaAs 光吸収層 1 3 2 の構造において、ショットキー接合を有する櫛形電極領域（受光領域）1 3 5 が形成されている。ここで、素子容量はショットキー接合部で規定されるので低減されるが、受光領域は櫛形電極が暴露するので、表面入射構造では遮光され十分な光結合効率が得られないという問題を有する。図 1 4 には、後者の選択拡散型半導体受光素子を示す。半導体受光素子は、n（+）ー型半導体層 1 4 1、n ー型半導体光吸収層 1 4 2 の構造において、選択拡散により p ー型半導体光吸収層 1 4 3 を形成している。本構造では、選択拡散により pn 接合領域を部分的に形成することにより、pn 接合面積が低減し容量低減効果が期待されるが、実際には拡散横部での接合容量が問題となり十分には低減できない。

20

30

【特許文献 1】特開昭 6 1－1 8 2 2 7 4 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

光通信、光情報処理、光計測等の装置では、高周波帯域および光結合方法に応じて、半導体受光素子の最適設計が要求される。特に最近の光通信方式では、 20Gbps を越える高速領域でも低コスト化の観点よりマルチモードファイバー（MMF）の適用が始まっており、光伝送装置、さらには超高速コンピュータにおける架間光伝送装置等で検討されている。この場合、伝搬ビーム径の広い MMF と光結合を得るための受光直径は $50\mu\text{m}$ 以上が要求されるが、高周波帯域（ 20Gbps ）からの受光直径限界は $30\mu\text{m}$ であり、光結合効率と帯域を両立することが出来ない。MMF 適用において十分な性能を得るためには、素子容量を低減して受光直径の拡大が重要となる。また、DVD 等の光ピックアップにおいても、光電気変換効率（ V/W ）を高めるために、半導体受光素子（Si 系）の後段に高入力抵抗（～数キロオーム）を有する IC 増幅器を接続している。このため、システムに要求される数百 MHz の高周波帯域を得るためには、半導体受光素子には過大な容量低下が要求される。以より、光通信、光情報処理、光計測等の装置において、素子容量を低減した高性能な半導体受光素子が求められている。

40

【課題を解決するための手段】

【0008】

50

上記の課題を解決するため、本発明請求項1に記載の半導体受光素子は、半導体基板上に半導体光吸収層及び半導体層を積層してなる半導体受光素子において、前記半導体光吸収層と前記半導体層は異なる伝導型を有し、かつ前記半導体層から前記半導体層に達する開孔領域を複数個有することを特徴とする。

【0009】

本発明請求項2に記載の半導体受光素子は、半導体基板上に、半導体光吸収層及び半導体層を積層してなる半導体受光素子において、前記半導体光吸収層と前記半導体層との間に、前記半導体層と異なる伝導型を有する半導体窓層を介在させ、かつ前記半導体層から前記半導体層窓層に達する前記開孔領域を複数個有することを特徴とする。

【0010】

本発明請求項3に記載の半導体受光素子は、請求項1又は請求項2に記載の半導体受光素子において、前記開孔領域の開孔直径が、受光領域面内で変化することを特徴とする。

【0011】

本発明請求項4に記載の半導体受光素子は、請求項1乃至請求項3のいずれか一項に記載の半導体受光素子において、前記開孔領域は、円形型、楕円形型、多角形型の形状であることを特徴とする。

【0012】

本発明請求項5に記載の半導体受光素子は、請求項1乃至請求項4のいずれか一項に記載の半導体受光素子において、前記半導体吸収層、前記半導体層及び前記半導体窓層を構成する半導体材料が、In、Al、Ga、As、P、N、Sb、Si、Ge、Hg、Cd、Te、Zn、S、O、Fe、Cu、Seであることを特徴とする。

【0013】

本発明請求項6に記載の光通信、光情報処理及び光計測装置は、請求項1乃至請求項5のいずれか一項に記載の半導体受光素子を搭載することを特徴とする。

【発明の効果】

【0014】

本発明の半導体受光素子によれば、10Gbps以上の光通信装置等において、マルチモードファイバー等との結合を損失することなく、広帯域で受光することが可能となる。また、DVD等の光情報処理においても、Si系PDの受光面積を低減することなく、数百MHzの応答が可能となる。これは、受光面内にpn接合を横切る開孔領域を複数個設けることにより、実効的なpn接合面積の減少が生じて、容量を低減することが可能となったためである。

【0015】

また、高効率での受光が可能となる。これは、半導体窓層を開孔領域直下に設けることにより、表面再結合等の影響を低減することが可能となったためである。

【0016】

さらに、高入力光信号に対する応答特性が改善する。これは、受光面内で、開孔領域幅を光信号強度分布に応じて変化させることにより、電界降下現象の影響を低減することが可能となったためである。

【0017】

以上本発明によれば、表面をp層としたPIN型構造を基本に記載しているが、逆転構造である表面n層のNIP型構造でも、これらの発明思想は受け継がれる。また、開孔領域の形状も、円形で記載しているが、楕円形、多角形型等の形状も適用可能である。以上の結果、本発明により、高効率かつ高速に受光する半導体受光素子の実現できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0018】

本発明の半導体受光素子の実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。

(第1の実施形態)

図1は、第1の実施形態にかかる半導体受光素子の構造図である。

本実施形態の半導体受光素子は、n型半導体基板層(半導体基板層)11上に、i型

10

20

30

40

50

半導体光吸収層（半導体光吸収層）及び p ー型半導体層（半導体層）13 をこの順で積層した構造である。ここで、受光領域 14 面内に本発明の特徴である開孔領域 15 が複数個形成されている。開孔領域 15 は、化学エッチング等により形成されるもので、p ー型半導体層 13 から i ー型半導体光吸収層 12 に貫通している。これにより、実効的な p n 接合面積が低減され、容量低減に繋がる。前述した従来構造（図 14）では、横方向の空乏化による接合が無視できず容量低減が不十分であるが、本発明の構造では p n 接合部が露出しているために上記の過剰な容量が存在しないことが特徴である。

【0019】

図 2 は、受光領域の直径（受光直径） Φ に対して、開孔領域 15 の直径（開孔直径） Φ （h）が、 $1\text{ }\mu\text{m}$ である開孔領域 15 を複数個設けた時（受光直径の増加に応じてその個数は増加）の高周波帯域 f c の計算予測を示す図である。

10

【0020】

図中では、従来の構造（開孔領域が存在しない素子）と本発明の構造を比較している。ここで、i ー半導体光吸収層の厚さ（i ー吸収層厚）t を $1.0\text{ }\mu\text{m}$ としている。これより、マルチモードファイバー結合が可能な受光直径 $50\text{ }\mu\text{m}$ では、容量低減により高周波帯域は 15 GHz となり、従来構造に比較して 50% の増大が予測される。これは、 20 Gbps の信号光を受光するのに可能な高周波帯域である。本発明の構造では、開孔領域 15 の底部で発生した光キャリアは、僅かに存在する電界によりドリフト走行して高濃度領域に達する。このため、開孔直径 Φ （h）が、走行時間として高周波帯域に影響を与える。つまり、目標帯域（帯域）にあわせて、開孔直径 Φ （h）を最適化する必要がある。図 3 は、ドリフト走行時間から推測される、目標帯域に対する開孔直径 Φ （h）の限界を示す図である。これより、例えば 20 GHz が所望の帯域とすれば開孔直径 Φ （h）限界は $3\text{ }\mu\text{m}$ となる。

20

（第 2 の実施形態）

図 4 は、第 2 の実施形態にかかる半導体受光素子の構造図である。

【0021】

本実施形態の半導体受光素子は、n ー型半導体層（半導体基板層）41 上に、i ー型半導体光吸収層（半導体光吸収層）42 及び p ー型半導体層（半導体層）43 をこの順で積層した構造である。ここで、i ー型半導体光吸収層 42 と p ー型半導体層 43 の間に本発明の特徴である i ー型半導体窓層（半導体窓層）46 が挿入されており、かつ受光領域 44 面内に開孔領域 45 が複数個形成されている。開孔領域 44 は、p ー型半導体層 43 から i ー型半導体窓層 46 に貫通している。ここで、i ー型半導体窓層 46 は、信号光のエネルギーよりも大きなバンドギャップを有する半導体層で、窓層の効果を有する。

30

【0022】

すなわち、図 1 に記載した発明構造においては、開孔領域 45 では i ー型半導体光吸収層が露出しているために、表面再結合による効率劣化が懸念される。図 4 では、開孔領域 44 を窓層で被服することにより、上記の表面再結合の影響が除去できる。ここで、開孔領域 44 の容量低減効果および開孔直径の決定は、図 1 と同様の思想に基づく。

（第 3 の実施形態）

図 5 は、第 3 の実施形態にかかる半導体受光素子の構造図である。

40

【0023】

本実施形態の半導体受光素子は、n ー型半導体層（半導体基板層）51 上に、i ー型半導体光吸収層（半導体光吸収層）52、i ー型半導体窓層（半導体窓層）56 及び p ー型半導体層 53 をこの順に積層した構造である。ここで、受光領域 54 面内に開孔領域 55 が複数個形成されており、開孔領域 55 は p ー型半導体層 53 から i ー型半導体窓層 56 に貫通している。ここで、本発明では、開孔領域 55 の直径（開孔直径）が受光領域面 54 内で変化することである。すなわち、開孔直径 Φ （h）が受光領域の中心では小さく、受光領域の端では大きくなっている。これは、通常入力信号光の強度分布 57 はガウシアン分布を有しており、受光領域 54 の中心では光強度が大きい。ここで、mW を越える高入力光が入射した場合、受光領域 54 の中心では開孔領域 55 直下に多数の光キャリアが

50

発生して、光吸収層の電界を弱めることが予測される。これは、一般には電界降下現象とされているものであるが、高周波帯域の劣化に繋がる。本発明は、光強度の強い受光領域 5 4 の中心では開孔直径 5 5 を小さくし、p n 接合直下の十分な電界を補償することにより電界降下を緩和することを狙ったもので、高入力光に対する特性を改善することが目的である。

【0024】

なお、本発明の半導体受光素子の構造を実現する上で、光通信、光情報処理、光計測等の装置に用いられる半導体受光素子としては、半導体材料が In、Al、Ga、As、P、N、Sb、Si、Ge、Hg、Cd、Te、Zn、S、O、Fe、Cu、Se 等に限定される。このように、本発明の半導体受光素子は、光通信、光情報処理、光計測等の装置に搭載することにより、高性能化が得られる。

10

【実施例】

【0025】

以下、本発明の実施例について図面を参照して詳細に説明する。

（実施例 1）

以下、図 6 を用いて本発明による半導体受光素子の実施例 1 について説明する。図 6 は、実施例 1 にかかる半導体受光素子の構造図である。

【0026】

実施例 1 の半導体受光素子の構造および原理は、図 1 に基づくものである。n 型 In P 基板（半導体基板）6 1 上に、格子整合した i 型 In Ga As 光吸収層（半導体光吸収層）6 2（層厚 $1\ \mu\text{m}$ ）、p 型 In P 窓層（半導体窓層）6 4（層厚 $0.5\ \mu\text{m}$ ）が形成されている。受光領域 6 9 は、マルチモードファイバー結合を目的としており、受光領域の直径（受光直径） $\Phi = 50\ \mu\text{m}$ である。受光領域面内には、本発明の特徴である開孔領域 6 8 が複数個形成されている。ここで、開孔領域 6 8 は、20 Gbps での適用を目的として開孔直径を $3\ \mu\text{m}$ 、深さはウェットエッチ法（ドライエッチ法でも可能）により $0.7\ \mu\text{m}$ とした。これにより、光結合効率は 60 %、また高周波帯域も従来構造（開孔領域を有さない構造）では 8 GHz であったが本発明構造で 16 GHz まで増大、20 Gbps 信号光を高効率で受光することが可能になった。この性能改善の要因は、本発明による開孔領域の適用により、実質的な p n 接合面積低減を介して容量低減が図られ、高速化に繋がったためである。このため、マルチモードファイバー結合においても、20 Gbps 信号光を受光することが可能となった。

20

30

【0027】

本実施例では、p 型 In P 窓層、i 型 In Ga As 光吸収層構造に適用されているが、n 型 In P 窓層、i 型 In Ga As 光吸収層構造においても同様の効果が得られる。

（実施例 2）

以下、図 7 を用いて本発明による半導体受光素子の実施例 2 について説明する。図 7 は、実施例 2 にかかる半導体受光素子の構造図である。

【0028】

実施例 2 の半導体受光素子の構造および原理は、図 4 に基づくものである。n 型 In P 基板（半導体基板）7 1 上に、格子整合した i 型 In Ga As 光吸収層（半導体光吸収層）7 2（層厚 $1\ \mu\text{m}$ ）、p 型 In P 窓層（半導体窓層）7 4（層厚 $0.5\ \mu\text{m}$ ）が形成、さらに本発明の特徴である i 型 In P 窓層 7 1 0（層厚 $0.2\ \mu\text{m}$ ）が i 型 In Ga As 光吸収層 7 2、p 型 In P 窓層 7 4 の間に挿入されている。受光領域は、マルチモードファイバー結合を目的としており、受光領域の直径（受光直径） $\Phi = 50\ \mu\text{m}$ である。受光領域面内には、本発明の特徴である開孔領域 7 8 が複数個形成されている。ここで、開孔領域 7 8 は、20 Gbps での適用を目的として開孔領域の直径（開孔直径）が $3\ \mu\text{m}$ 、深さはウェットエッチ法（ドライエッチ法でも可能）により $0.9\ \mu\text{m}$ とした。これにより、光結合効率は 70 %、また高周波帯域も従来構造（開孔領域を有さない構造）では 8 GHz であったが本発明構造では 16 GHz まで増大、20 Gbps 信号光

40

50

を高効率で受光すること可能になった。この改善の要因は、本発明による開孔領域の適用により、実質的なpn接合面積低減を介して容量低減が図られ高速化に繋がったこと、さらにi型InP窓層710を介在させたことにより、表面再結合の影響が低減され効率が改善されたためである。このため、マルチモードファイバー結合でありながら20Gbps信号光を高効率で受光することが可能となった。

【0029】

本実施例では、p型InP窓層、i型InP窓層、i型InGaAs光吸収層構造に適用されているが、n型InP窓層、i型InP窓層、i型InGaAs光吸収層構造においても同様の効果が得られる。

(実施例3)

以下、図8を用いて本発明による半導体受光素子の実施例3について説明する。図8は、実施例3にかかる半導体受光素子の構造図である。

【0030】

実施例3の半導体受光素子の構造および原理は、図5に基づくものである。n型InP基板(半導体基板)81上に、格子整合したi型InGaAs光吸収層(半導体光吸収層)82(層厚1 μ m)、i型InP窓層(半導体窓層)810(層厚0.2 μ m)、p型InP窓層84(層厚0.5 μ m)が形成されている。受光領域89は、マルチモードファイバー結合を目的としており、受光領域の直径(受光直径) $\Phi=50\mu$ mである。受光領域面内には、本発明の特徴である開孔直径を受光領域面内で変化させた開孔領域88が複数個形成されている。ここで、開孔直径は、20Gbpsかつ高光入力時の帯域劣化を抑制するために、受光領域の中心では開孔直径が1 μ m、受光領域の端では3 μ mへと徐々に増大するようになっている。深さは、ウェットエッチ法(ドライエッチ法でも可能)により0.9 μ mとした。これにより、光結合効率は70%、また高周波帯域も従来構造(開孔領域を有さない構造)では8GHzであったが本発明構造では15GHzまで増大、20Gbps信号光を高効率で受光することが可能になった。さらに、本構造では+3dBmの高入力光を入れても、顕著な帯域劣化が観測されなかった。この性能改善の要因は、本発明による開孔領域88の適用により、実質的なpn接合面積低減を介して容量低減が図られ高速化に繋がったこと、i型InP窓層810を介在させ表面再結合の影響を低減したこと、さらに開孔領域88の開孔直径を光強度分布に応じて変化させ電界降下による帯域劣化を抑制できたことによる。このため、マルチモードファイバー結合でありながら20Gbps信号光を高効率で受光し、さらに優れた高光入力特性も達成された。

【0031】

本実施例では、p型InP窓層、i型InP窓層、i型InGaAs光吸収層構造に適用されているが、n型InP窓層、i型InP窓層、i型InGaAs光吸収層構造においても同様の効果が得られる。

(実施例4)

以下、図9を用いて本発明による半導体受光素子の実施例4について説明する。図9は、実施例4にかかる半導体受光素子の構造図である。

【0032】

実施例4の半導体受光素子の構造および原理は、図1に基づくものである。Si基板上に、p型Si層91、i型Si光吸収層(半導体光吸収層)92(層厚10 μ m)、n型Si層94(層厚0.5 μ m)が形成されている。受光領域は、DVDピックアップ方式(帯域100MHz)に対応するために4分割されており、1個の受光領域は40 μ mの正方形である。受光領域面内には、本発明の特徴である開孔領域98が複数個形成されている。ここで、本発明の受光素子後段には、入力抵抗10k Ω の増幅ICが接続する。このため、帯域100MHzを得るために受光素子に要求される素子容量は、150fF以下である。本実施例では、開孔領域98は2 μ mの正形状にして、かつp型Si層91は1 μ m幅で形成した。深さは、ドライエッチ法により0.7 μ mで形成した。これ

により素子容量は、従来構造（開孔領域の有さないもの）では200fFであったが、本発明構造で130fFまで低減された。これにより、100MHzでの駆動が可能となった。この性能改善の要因は、本発明による開孔領域の適用により、実質的なpn接合面積低減を介して容量低減が図られ、高速化に繋がったことによる。

【0033】

本実施例では、n型Si層、i型Si光吸収層、p型Si層構造に適用されているが、p型Si層、i型Si光吸収層、n型Si層構造においても同様の効果が得られる。

（実施例5）

以下、図10を用いて本発明による半導体受光素子の実施例5について説明する。図10は、実施例5にかかる半導体受光素子の構造図である。本実施例では内部利得効果を有するアバランシェ増倍型半導体受光素子への適用を図ったものである。

【0034】

実施例5の半導体受光素子の構造および原理は、図5に基づくものである。n型InP基板（半導体基板）101上に、格子整合したi型InGaAs光吸収層（半導体吸収層）102（層厚1 μ m）、i型InP窓層（半導体窓層）1010（層厚0.2 μ m）、p型InP窓104（層厚0.5 μ m）が形成されており、さらにi型InGaAs光吸収層102の直下には、i型InAlAs増倍層1012、p型InAlAs電界緩和層1011が付加されている。受光領域の直径は、マルチモードファイバー結合を目的としており、受光直径 $\Phi=50\mu$ mである。受光領域面内には、本発明の特徴である開孔領域108が複数個形成されている。ここで、開孔領域108は、20Gbpsかつ高光入力時の性能を満たすために、受光領域の中心では開孔直径が1 μ m、受光領域の端では3 μ mへと徐々に増大するようになっている。深さは、ウェットエッチ法（ドライエッチ法でも可能）により0.9 μ mとした。これにより、光結合効率は70%、また高周波帯域も従来構造（開孔領域の有さない構造）では増倍率 ~ 2 において8GHzであったが本発明構造では15GHzまで増大、20Gbps信号光を高効率で受光することが可能になった。さらに、本構造では+0dBmの高入力光を入れても、顕著な帯域劣化が観測されなかった。この性能改善の要因は、本発明による開孔領域108の適用により、実質的なpn接合面積低減を介して容量低減が図られ高速化に繋がったこと、i型InP窓層1010を介在させることにより表面再結合の影響を低減したこと、さらに開孔領域108の開孔直径を光強度分布に応じて変化させ電界降下による帯域劣化を抑制できたことによる。このため、マルチモードファイバー結合でありながら20Gbps信号光を高効率で受光、さらに高光入力特性に優れたアバランシェ増倍型半導体受光素子が実現できた。

【0035】

以上のように、本発明により、光結合効率を低減することなく高速に受光することが可能な半導体受光素子を実現できる。また、本発明により実現された半導体受光素子は、光通信、光情報処理、光計測装置に搭載することにより、高性能化が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0036】

【図1】第1の実施形態にかかる半導体受光素子の構造図である。

【図2】本発明による半導体受光素子の高周波帯域（受光直径依存性）である。

【図3】本発明による半導体受光素子の開孔領域の直径限界である。

【図4】第2の実施形態にかかる半導体受光素子の構造図である。

【図5】第3の実施形態にかかる半導体受光素子の構造図である。

【図6】実施例1にかかる半導体受光素子の構造図である。

【図7】実施例2にかかる半導体受光素子の構造図である。

【図8】実施例3にかかる半導体受光素子の構造図である。

【図9】実施例4にかかる半導体受光素子の構造図である。

【図10】実施例5にかかる半導体受光素子の構造図である。

【図 1 1】従来構造による半導体受光素子の構造図である。

【図 1 2】従来構造による半導体受光素子の高周波帯域（受光直径依存性）である。

【図 1 3】従来構造による半導体受光素子の構造図（メタルショットキーメタル型）である。

【図 1 4】従来構造による半導体受光素子の構造図（選択拡散型）である。

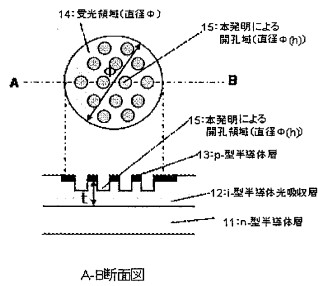
【符号の説明】

【 0 0 3 7 】

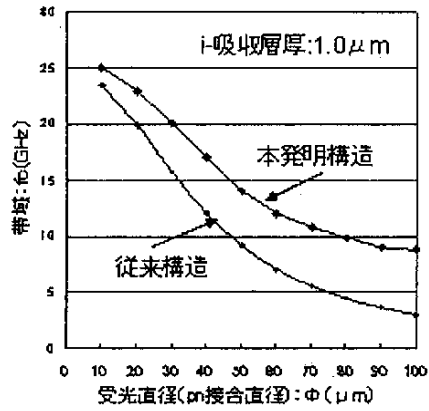
1 1	n 型半導体層	
1 2	i 型半導体光吸収層	
1 3	p 型半導体層	10
1 4	受光領域（直径 Φ ）	
1 5	本発明による開孔領域（直径 Φ （h））	
4 1	n 型半導体層	
4 2	i 型半導体光吸収層	
4 3	p 型半導体層	
4 4	受光領域（直径 Φ ）	
4 5	本発明による開孔領域（直径 Φ （h））	
4 6	本発明による i 型半導体窓層	
5 1	n 型半導体層	
5 2	i 型半導体光吸収層	20
5 3	p 型半導体層	
5 4	受光領域（直径 Φ ）	
5 5	本発明による開孔領域（開孔直径 Φ （h）が変化）	
5 6	本発明による i 型半導体窓層	
5 7	入力信号光の光強度分布	
6 1	n 型 I n P 基板	
6 2	i 型 I n G a A s 光吸収層	
6 3	n 型 I n P 層	
6 4	p 型 I n P 窓層	
6 5	S i N 膜	30
6 6	p 型電極	
6 7	n 型電極	
6 8	開孔領域（直径 Φ （h））	
6 9	受光領域	
7 1	n 型 I n P 基板	
7 2	i 型 I n G a A s 光吸収層	
7 3	n 型 I n P 層	
7 4	p 型 I n P 窓層	
7 5	S i N 膜	
7 6	p 型電極	40
7 7	n 型電極	
7 8	開孔領域（直径 Φ （h））	
7 9	受光領域	
7 1 0	i 型 I n P 窓層	
8 1	n 型 I n P 基板	
8 2	i 型 I n G a A s 光吸収層	
8 3	n 型 I n P 層	
8 4	p 型 I n P 窓層	
8 5	S i N 膜	
8 6	p 型電極	50

8 7	n 型電極	
8 8	開孔領域（開孔直径 Φ （h）が変化）	
8 9	受光領域	
8 1 0	i ー型 I n P 窓層	
9 1	p ー型 S i 層	
9 2	i ー型 S i 光吸収層	
9 4	n ー型 S i 層	
9 5	S i N 膜	
9 6	n 型電極	
9 8	開孔領域	10
9 9	受光領域（4 分割）	
1 0 1	n ー型 I n P 基板	
1 0 2	i ー型 I n G a A s 光吸収層	
1 0 3	n ー型 I n P	
1 0 4	p ー型 I n P 窓層	
1 0 5	S i N 膜	
1 0 6	p 型電極	
1 0 7	n 型電極	
1 0 8	開孔領域（開孔直径 Φ （h）が変化）	
1 0 9	受光領域	20
1 0 1 0	i ー型 I n P 窓層	
1 0 1 1	p ー型 I n A l A s 電界緩和層	
1 0 1 2	i ー型 I n A l A s 増倍層	
1 1 1	n ー型 I n P 基板	
1 1 2	i ー型 I n G a A s 光吸収層	
1 1 3	n ー型 I n P	
1 1 4	p ー型 I n P 窓層	
1 1 5	S i N 膜	
1 1 6	p 型電極	
1 1 7	n 型電極	30
1 1 9	受光領域	
1 3 1	n ー型 I n P 基板	
1 3 2	i ー型 I n G a A s 光吸収層	
1 3 3	取り出し電極 1	
1 3 4	取り出し電極 2	
1 3 5	櫛形電極領域（受光領域）	
1 4 1	n（+）ー型半導体層	
1 4 2	n ー型半導体光吸収層	
1 4 3	p ー型半導体光吸収層（拡散領域）	
1 4 4	n ー型半導体光吸収層（非拡散領域）	40
1 4 5	受光領域	

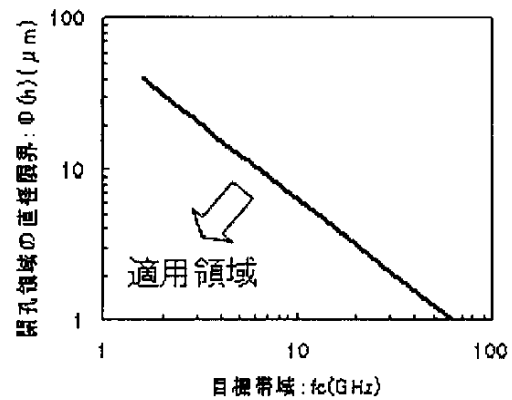
【図 1】



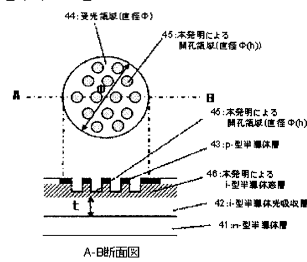
【図 2】



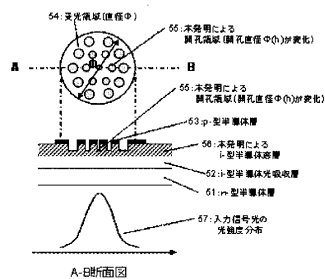
【図 3】



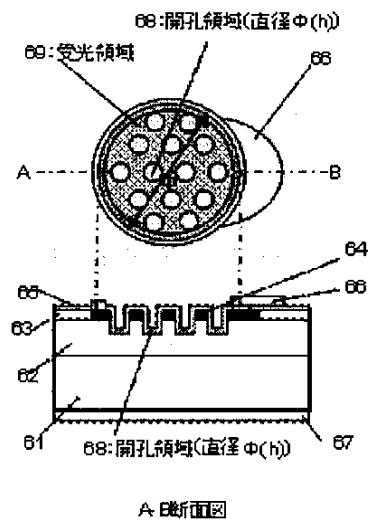
【図 4】



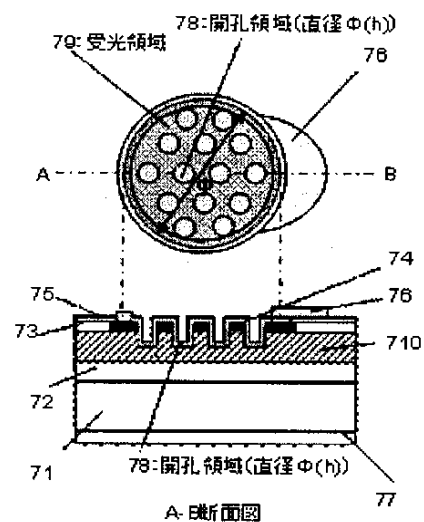
【図 5】



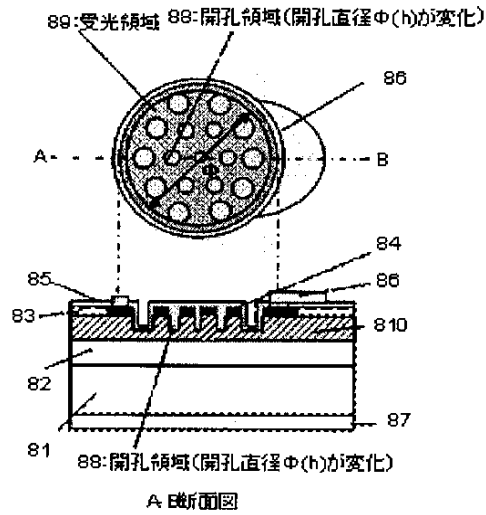
【図 6】



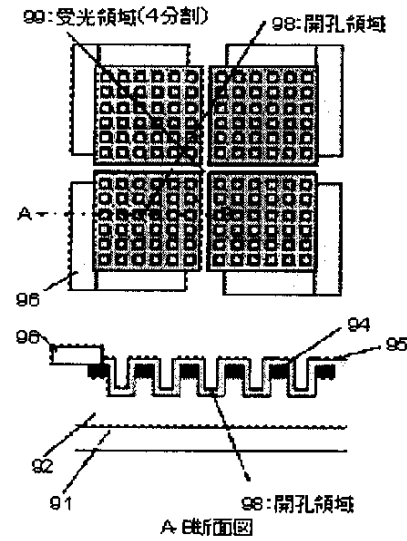
【図 7】



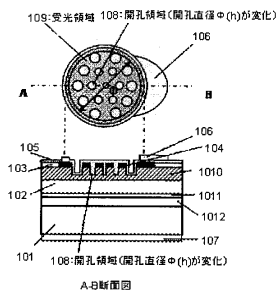
【図 8】



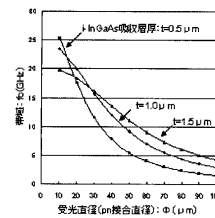
【図 9】



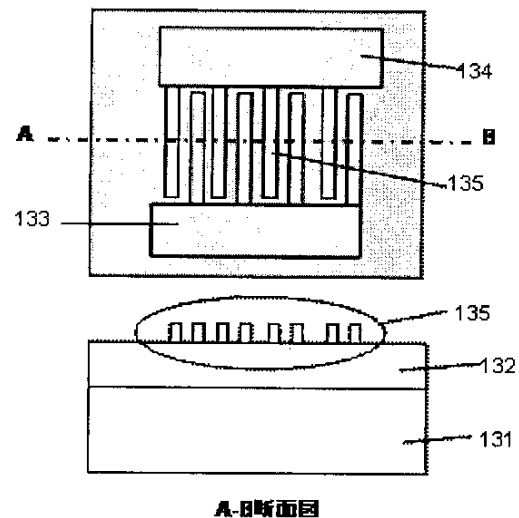
【図 10】



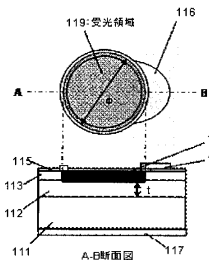
【図 12】



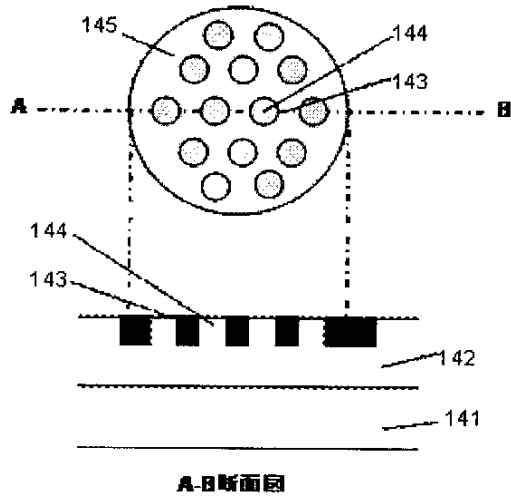
【図 13】



【図 11】



【図 14】



Christopher Field
Japanese Technical Interpreting and Translation
52 Sherman Bridge Rd., Wayland MA 01778 Tel. 617-905-6060
www.christopherfield.com



Verify at www.atanet.org/verify

CERTIFICATION OF TRANSLATION

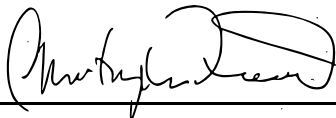
I, Christopher L. Field, residing at 52 Sherman Bridge Rd., Wayland MA, 01778, United States of America, declare and state as follows:

I am well acquainted with the English and Japanese languages. I have translated numerous Japanese documents of legal and/or technical content into English. I am fully accredited by the American Translators Association (ATA) for Japanese to English translation, and my ATA certification number is 423514.

I have personally translated the attached document, entitled "JP2007-165359A (Makita)" I hereby certify that the English translation of the attached documents is an accurate translation to the best of my knowledge and ability.

I further declare that all statements made herein of my own knowledge are true, that all statements made on information and belief are believed to be true, 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 at Wayland, MA, 5 May 2025

Signed, _____

Christopher Field

ATA Certified Translator, Japanese to English, Certificate No. 423514