

Повышение чувствительности кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов к излучению с длиной волны 1,06 мкм

А. К. Будтолаев, Г. В. Либерова, В. И. Хижняк

Исследованы возможности повышения уровня чувствительности $p-i-n$ -фотодиодов к излучению с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм. Проведён расчёт двухслойного просветляющего покрытия, состоящего из плёнок SiO_2 и Si_3N_4 . Представлены результаты эксперимента, проведённого на основании данного расчёта.

Ключевые слова: $p-i-n$ -фоточувствительный элемент, чувствительность, длина волны, просветляющее покрытие, SiO_2 , Si_3N_4 , просветление.

Ссылка: Будтолаев А. К., Либерова Г. В., Хижняк В. И. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 47.

Reference: A. K. Budtolaev, G. V. Liberova, and V. I. Khizhnyak, Prikl. Fiz., No. 5, 47 (2018).

Введение

Полупроводниковые приборы, чувствительные к излучению с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм, предназначены для использования в различной электронно-оптической аппаратуре, в т. ч. в которой требуется регистрация коротких импульсов лазерного излучения (10–40 нс). К такой аппаратуре относятся лазерные дальномеры, системы наведения по лучу, обнаружители лазерного излучения, системы защиты от лазерного оружия, высокоточное оружие и другие оптические системы [1–4]. К подобным приборам, реализуемым, в частности, на базе кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов, предъявляются, как правило, достаточно высокие требования по величине токовой монохроматической чувствительности.

Одним из путей увеличения уровня чувствительности $p-i-n$ -фотодиода является уменьшение потери на отражение излучения от его фоточувствительной области, которое может быть достигнуто с помощью специального просветляющего покрытия.

Целью данной работы является выбор и расчёт двухслойного просветляющего покрытия с учетом его параметров и материала.

Методика расчёта

Существует несколько вариантов конструкций системы просветляющего покрытия. Они подробно рассмотрены, например, в книгах [4–7].

На рис. 1 представлена система обозначений, принятая для показателей преломлений двухслойной конструкции. Здесь показатели преломления окружающей среды и подложки обозначены соответственно через n_0 и n_s , а слои нумеруются по порядку от наружного слоя к подложке.

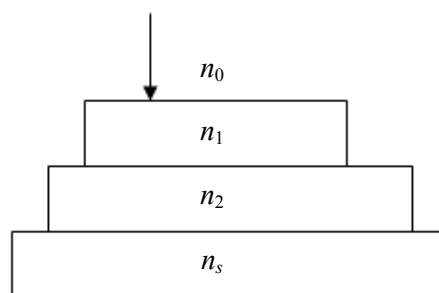


Рис. Система обозначений для показателей преломления.

Рассмотрим исходный вариант однослойной модели просветляющего покрытия, толщина которого в первом приближении рассчитывается по следующей формуле:

$$d = \frac{\lambda}{4n} \tag{1}$$

где n – показатель преломления слоя плёнки.

Для длины волны $\lambda = 1,06$ мкм толщина d плёнки (при показателе преломления $n = 1,46$) должна быть порядка 180 нм. В качестве такого

Будтолаев Андрей Константинович, вед. инженер-технолог.
 Либерова Галина Владимировна, гл. спец.
 Хижняк Владимир Игоревич, инженер.
 АО «НПО «Орион».
 Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
 E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 9 июня 2018 г.

просветляющего покрытия обычно используется плёнка SiO_2 . Чувствительность устройств с таким просветляющим покрытием составляет 0,38 А/Вт.

Более высокие показатели чувствительности можно ожидать при использовании покрытия на базе нитрида кремния Si_3N_4 с показателем преломления $n_1 = 2$. Однако выращивание слоя Si_3N_4 непосредственно на кремниевой пластине (подложке) из-за разности коэффициентов теплового расширения (КТР) может привести к растрескиванию просветляющей плёнки [5]. Поэтому необходим переход к двухслойному покрытию, где в качестве нижнего просветляющего слоя используется плёнка SiO_2 .

С точки зрения совместимости процессов формирования двухслойного просветляющего покрытия с технологией изготовления самого $p-i-n$ -фоточувствительного элемента, выбран вариант, в котором отношение толщин слоев не равно целому числу, а соотношение показателей преломления слоев удовлетворяет условиям, при которых слой с высоким показателем преломления может располагаться снаружи:

$$n_1 \geq \sqrt{n_s} \text{ и } 1 \leq n_2 \leq \sqrt{n_s}. \quad (2)$$

Итак, в качестве наружного слоя выбрана пленка нитрида кремния Si_3N_4 с показателем преломления $n_1 = 2$, а в качестве второго слоя – пленка двуокиси кремния с показателем преломления $n_2 = 1,46$ [6]. Показатель преломления окружающей среды $n_0 = 1$, показатель преломления кремниевой подложки $n_s = 3,57$ [7].

Используем следующие формулы, приведенные в [5]:

$$\text{tg}^2 \varphi_1 = \frac{n_1^2 (n_s - n_0)(n_2^2 - n_0 n_s)}{(n_1^2 n_s - n_2^2 n_0)(n_0 n_s - n_1^2)} \quad (3)$$

$$\text{tg}^2 \varphi_2 = \frac{n_2^2 (n_s - n_0)(n_0 n_s - n_1^2)}{(n_1^2 n_s - n_2^2 n_0)(n_2^2 - n_0 n_s)} \quad (4)$$

где $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 / \lambda$, $\varphi_2 = 2\pi n_2 d_2 / \lambda$.

По эти формулам определим требуемые толщины слоев пленки нитрида кремния $d_1 = 88$ нм и пленки двуокиси кремния $d_2 = 40$ нм.

Следовательно, возникает конкретная техническая задача: для повышения уровня монохроматической импульсной чувствительности к длине волны 1,06 мкм необходимо сформировать на фоточувствительной области кремниевого $p-i-n$ -фотодиода двухслойное просветляющее покрытие на основе пленки нитрида кремния толщиной 88 нм и пленки двуокиси кремния толщиной 40 нм.

Экспериментальные исследования

В соответствии с расчётами двойного просветляющего покрытия, была изготовлена партия $p-i-n$ -фоточувствительных элементов, на которой была применена разработанная технология осаждения тонких пленок нитрида и двуокиси кремния.

Первая плёнка (просветляющее покрытие SiO_2) толщиной $d_2 = 40$ нм и коэффициентом преломления $n_2 = 1,43$ выращивалась низкотемпературным ($T = 450$ °С) пиролитическим методом на установке Ругох из смеси газов 4,5 % SiH_4 в Ar и O_2 . Вторая плёнка для просветляющей системы (просветляющее покрытие Si_3N_4) толщиной $d_1 = 88$ нм и коэффициентом преломления $n_1 = 2,00$ выращивалась низкотемпературным ($T \leq 300$ °С) методом плазмохимического осаждения из газовой фазы смеси газов 4,5 % SiH_4 в Ar и N_2 на установке RDE 300.

На изготовленных фоточувствительных элементах измерялась монохроматическая импульсная чувствительность S_λ к излучению с длиной волны 1,06 мкм, а также определялся процент выхода годных.

В таблице приведены сравнительные типовые значения S_λ $p-i-n$ -фоточувствительных элементов с однослойным и двухслойным просветляющим покрытием.

Таблица

Тип просветляющего покрытия	S_λ , А/Вт	% выхода годных
Однослойное SiO_2 $d = 180$ нм	0,38	45
Двухслойное SiO_2 $d = 40$ нм / Si_3N_4 $d = 88$ нм	0,44	57

Из приведенных результатов следует, что переход к двухслойному просветляющему покрытию приводит к заметному повышению уровня монохроматической импульсной чувствительности к длине волны 1,06 мкм и к увеличению выхода годных фоточувствительных элементов.

Заключение

В работе исследованы возможности повышения уровня чувствительности $p-i-n$ -фотодиодов к излучению с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм путём перехода к двухслойному просветляющему покрытию. Проведён расчёт двухслойного просветляющего покрытия, состоящего из плёнок SiO_2 и Si_3N_4 . Представлены результаты экспериментов, проведённых на основании данного расчёта, из которых следует, что переход к двухслойному просветляющему покрытию приводит к заметному повышению уровня монохроматической импульс-

ной чувствительности к длине волны 1,06 мкм и к увеличению выхода годных фоточувствительных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2007.
2. Трищенко М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. – М.: Радио и связь, 1992.

3. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011.
4. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Фотоприемники в оптико-электронных приборах и системах. – М.: Физматкнига, 2016.
5. Хасса Г. и Туна Р. Э. Физика тонких пленок. – М.: Мир, Т. 2. 1967.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984.
7. Йесперса П., Ван де Виле Ф., Уайта М. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения. – М.: Мир, 1979.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz

Increasing the sensitivity of silicon *p-i-n*-photodiodes to the 1.06 μm radiation

A. K. Budtolaev, G. V. Liberova, and V. I. Khizhnyak

Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received June 9, 2018

Investigated are the possibilities of increasing the sensitivity of the *p-i-n*-photosensitive elements to radiation with a wavelength of $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$. This paper presents a calculation of a two-layer antireflection coating consisting of the SiO_2 and Si_3N_4 films allowing to increase the sensitivity level of the *p-i-n*-photosensitive element. The results of the experiment based on this calculation are also presented.

Keywords: *p-i-n*-photosensitive element, sensitive, wavelength, antireflection coating, SiO_2 , Si_3N_4 , enlightenment.

REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Physical Foundations*. (Fizmatkniга, Moscow, 2007) [in Russian].
2. M. A. Trishenkov, *Photodetectors and CCD. Detection of Weak Optical Signals* (Radio i Svyaz', Moscow, 1992) [in Russian].
3. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Photodiodes* (Fizmatkniга, Moscow, 2011) [in Russian].
4. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Photodetectors in Optoelectronic Devices and Systems* (Fizmatkniга, Moscow, 2016) [in Russian].
5. G. Hassa and R. E. Tuna, *Physics of Thin Films* (Mir, Moscow, 1967) [in Russian].
6. S. Zee, *Physics of Semiconductor Devices* (Mir, Moscow, 1984) [in Russian].
7. P. Yispersa, F. Van de Vile, and M. Waite, *Semiconductor Formers of Images* (Mir, Moscow, 1979) [in Russian].