

УДК 621.383:621.315.5

## Использование тонких пленок SiO<sub>2</sub> для формирования охранного кольца в лавинных фотодиодах на основе InGaAs/InP

А. К. Будтолаев, П. Е. Хакуашев, И. В. Чинарева, Л. А. Косухина

Для предотвращения раннего краевого пробоя в планарных лавинных фотодиодах на основе InGaAs/InP часто используют структуру *p-n*-перехода с заглубленной центральной областью и мелкой периферией. В статье говорится о *p-n*-переходе с разными глубинами залегания, полученного одностадийной диффузией. Такой переход получается при прохождении примеси через плёнку SiO<sub>2</sub> определённой толщины. Приведены результаты экспериментов, проведённых на образцах с плёнками SiO<sub>2</sub>, выращенных разными методами. Результаты исследований показали, что образцы с плёнкой SiO<sub>2</sub>, выращенной пиролитическим методом при  $T = 250$  К, имеют лучшие характеристики по сравнению с остальными. Уменьшая температуру пиролитического осаждения SiO<sub>2</sub>, можно улучшить *C-V* характеристики.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Ключевые слова: SiO<sub>2</sub>, охранное кольцо, *p-n*-переход, диффузия, пиролиз, InGaAs/InP, лавинный фотодиод.

### Введение

Для предотвращения раннего краевого пробоя в планарных лавинных фотодиодах на основе InGaAs/InP часто используют структуру *p-n*-перехода (рис. 1) с заглубленной центральной областью и мелкой периферией [1].

В нескольких работах сообщается об одновременном получении *p-n*-перехода на разной глубине путем одностадийной диффузии или имплантации. Это происходит за счет использования тормозной способности пленки SiO<sub>2</sub> [28] в случае ионной имплантации бериллия или различия коэффициентов диффузии в тонкой пленке SiO<sub>2</sub> при диффузии цинка (Zn). Наиболее полно изучены закономерности диффузии Zn в системе SiO<sub>2</sub> – GaAs в широком интервале условий диффузии, причем опытным путём определен коэффициент диффу-

зии Zn в SiO<sub>2</sub> [9, 11, 27—30]. Коэффициент диффузии в пленке сравним с коэффициентом диффузии в GaAs и определяется выражением из работы [9]:

$$D_{\text{SiO}_2} = 15 \exp(-2,49/kT) \quad (1)$$

где  $k = 8,6 \times 10^{-5}$  эВ/К постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура в К.

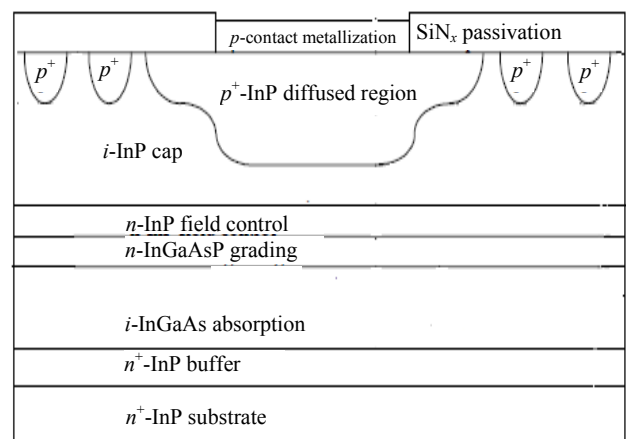


Рис. 1. Структура лавинного фотодиода на основе InGaAs/InP.

Коэффициент диффузии для InP:

$$D_{\text{InP}} = 8,67 \exp(-1,73/kT). \quad (2)$$

Будтолаев Андрей Константинович, ведущий инженер-технолог.

Хакуашев Павел Евгеньевич, зам. начальник ПТК по производству.

Чинарева Инна Викторовна, ведущий инженер-технолог.

Косухина Лариса Альбертовна, ведущий инженер-технолог. АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. (495) 672-20-31. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2016 г.

© Будтолаев А. К., Хакуашев П. Е., Чинарева И. В., Косухина Л. А., 2016

Стандартная температура проведения диффузии Zn в InP — 523К, тогда имеем следующие оценки:

$$D_{\text{InP}} = 4,5 \times 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с},$$

$$D_{\text{SiO}_2} = 8,7 \times 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}.$$

С точностью до 10 % положение глубины *p-n*-перехода определяется по приближенной формуле:

$$x_j = 5,4 \times \sqrt{(D \times t)}, \quad (3)$$

где  $t = 20 \text{ мин} = 1200 \text{ с}$  — время, необходимое для получения заданной глубины перехода в центральной части, которое определяет рабочее напряжение в лавинном фотодиоде.

Соответственно толщина *d* для SiO<sub>2</sub> должна быть такой, чтобы обеспечить разницу в глубине *p-n*-перехода в  $\Delta x = 0,3 \div 0,5 \text{ мкм}$  [1], т.е. должно выполняться соотношение:

$$\Delta x = 5,4 \times \sqrt{D_{\text{InP}}} \times (\sqrt{t} - \sqrt{t_1}) \quad (4)$$

где  $t_1 = d^2 / (5,4^2 \times D_{\text{SiO}_2})$  — время, необходимое для преодоления цинком пленки толщиной *d*. Можно сказать, что  $t_2 = t - t_1$  — время диффузии в InP. Результаты расчетов показаны на рис. 2.

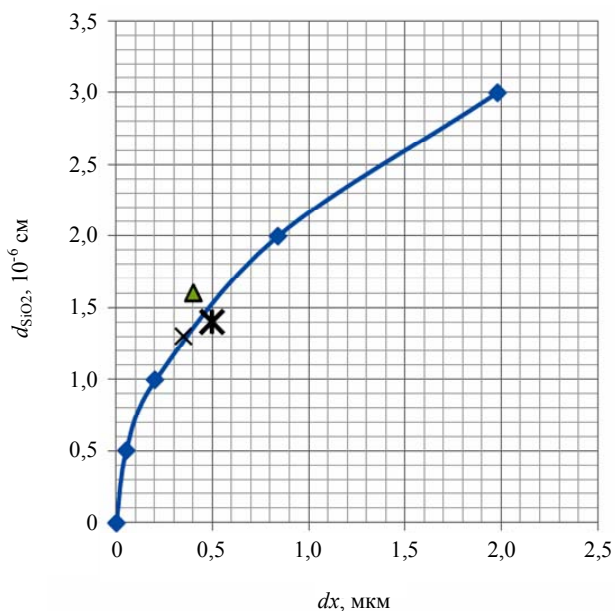


Рис. 2. Связь толщины SiO<sub>2</sub>  $d_{\text{SiO}_2}$  с глубиной залегания *p-n*-перехода  $\Delta x$ . Сплошная линия — расчет; крестики и треугольник — эксперимент.

Таким образом, для обеспечения заданного перепада в глубине диффузии цинка при 500 °С необходима пленка толщиной 120—160 Å.

### Выбор метода нанесения маскирующей пленки

Требуемая толщина SiO<sub>2</sub> на поверхности InP может быть получена следующими методами:

- плазмо-химическим осаждением;
- ВЧ-распылением;
- пиролитическим разложением моносилана.

Кроме того, процесс нанесения пленки не должен увеличивать поверхностные токи утечки *p-n*-перехода. Величина токов утечки и электрическая стабильность фотодиодов определяется в основном качеством пассивации поверхности. В связи с этим необходимо применение пассивирующей пленки, имеющей низкую плотность поверхностных состояний и малый встроенный заряд, чтобы избежать возникновения на поверхности инверсионного слоя.

Из-за заметного уже при 400 °С испарения фосфора с поверхности InP и возможной деградации границы раздела были выбраны низкотемпературные способы осаждения, а именно, катодное ВЧ-распыление мишени и пиролитическое осаждение SiO<sub>2</sub>.

### Экспериментальные исследования

На эпитаксиальную структуру, защищенную пленкой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> со вскрытыми окнами под диффузию Zn, различными методами наносилась тонкая пленка SiO<sub>2</sub>. Затем проводилась диффузия с последующим удалением SiO<sub>2</sub> в буферном травителе. При ВЧ-распылении мишени за время  $t = 135 \text{ с}$  была получена пленка толщиной 160 Å с показателем преломления  $n = 1,45$ . Кроме того, было проведено два процесса пиролитического осаждения пленки SiO<sub>2</sub>, причем при  $T = 320 \text{ °С}$  за  $t = 30 \text{ с}$  и при  $T = 250 \text{ °С}$  за  $t = 5 \text{ с}$  были получены пленки толщинами 130 Å с  $n = 1,44$  и 140 Å с  $n = 1,46$  соответственно. Толщина и показатель преломления пленок контролировались эллипсометрическим методом.

Диффузия проводилась в кварцевой ампуле при температуре 500 °С в течение 20 с. Глубина *p-n*-переходов определялась экспериментально путем пересчета C-V-характеристик. Подробно метод описан в [1]. Глубина *p-n*-перехода в открытом InP составила 1,9 мкм, через пленку толщиной 140 Å — 0,5 мкм.

Для оценки влияния метода осаждения на границу раздела Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/InP (используемая в фотодиодах в качестве пассивирующей) полученная МДП-структура исследовалась путем измерения C-V-характеристик тестовых образцов при частоте 1 МГц. Металлические электроды напылялись в

вакууме. Рисунок выявлялся стандартным фотоли-  
тографическим способом путем травления метал-  
ла. Диаметр металлизации 250 мкм.

### Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены экспериментальные  
C-V-характеристики тестовых МДП-структур  
 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{InP}$  после нанесения и последующего удале-  
ния  $\text{SiO}_2$ .

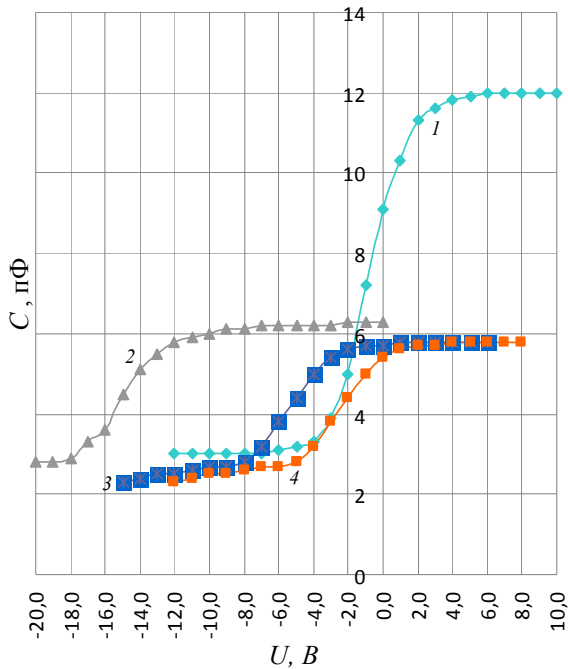


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики тестовых МДП-  
структур  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{InP}$ . Кривая 1 — образец 2\_1; 2 — образец  
2-4; 3 — образец 3-1; 4 — образец 3-2.

Рассчитаны и приведены в таблице значения  
напряжения плоских зон  $U_{fb}$  для различных границ  
раздела.

Таблица

№ образца	Метод создания $\text{SiO}_2$	$U_{fb}$ , В
2_1	без $\text{SiO}_2$	-0,5
2-4	ВЧ напыление	-14
3-1	Пиролиз при $T = 320$ °С	-5,5
3-2	Пиролиз при $T = 250$ °С	-1

Сдвиг кривых в отрицательную область, по-  
видимому, связан с образованием в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  положи-  
тельного заряда и его сохранении после удаления  
оксида, что зависит от метода осаждения пленки  
 $\text{SiO}_2$ . При ВЧ-распылении этот заряд больше, чем  
при пиролитическом осаждении. При пиролизе  
заряд уменьшается по мере уменьшения темпера-  
туры осаждения.

Кроме этого, контролировались вольт-ам-  
перные характеристики тестовых диодов, изготов-  
ленных обычной диффузией цинка и диффузией  
через тонкую пленку  $\text{SiO}_2$ . Наблюдалась корреля-  
ция уровня темнового тока со значением  $U_{fb}$ .

Минимальные значения токов были получе-  
ны для стандартной диффузии, максимальные для  
диффузии через пленку методом ВЧ-распыления.

Так как влияние радиационного воздействия  
превосходит влияние термической обработки, то  
тонкие пленки  $\text{SiO}_2$  (100—200 Å), полученные  
низкотемпературным пиролитическим разложени-  
ем моносилана, могут быть использованы для  
формирования охранного кольца в лавинных фо-  
тодиодах на основе  $\text{InGaAs}/\text{InP}$ . Возможно даль-  
нейшее уменьшение отрицательного смещения  
вольт-емкостной кривой при уменьшении темпе-  
ратуры пиролитического осаждения до 200 °С.

### Заключение

Для предотвращения раннего краевого про-  
боя в планарных лавинных фотодиодах на основе  
 $\text{InGaAs}/\text{InP}$  обычно используют структуру  $p$ - $n$ -пе-  
рехода с заглубленной центральной областью и  
мелкой периферией.

В работе рассматриваются  $p$ - $n$ -переходы с  
разными глубинами залегания, полученными од-  
ностадийной диффузией. Такой переход получае-  
тся при прохождении примеси через плёнку  $\text{SiO}_2$   
определённой толщины. Приведены результаты  
экспериментов, проведённых на образцах с плён-  
ками  $\text{SiO}_2$ , выращенных разными методами. Ре-  
зультаты исследований показали, что образцы с  
плёнкой  $\text{SiO}_2$ , выращенной пиролитическим мето-  
дом при  $T = 250$  К, имеют лучше характеристики  
по сравнению с остальными. Уменьшая темпера-  
туру пиролитического осаждения  $\text{SiO}_2$ , можно  
улучшить C-V характеристики.

Так как влияние радиационного воздействия  
превосходит влияние термической обработки, то  
тонкие пленки  $\text{SiO}_2$  (100—200 Å), полученные  
низкотемпературным пиролитическим разложени-  
ем моносилана, могут быть использованы для  
формирования охранного кольца в лавинных фо-  
тодиодах на основе  $\text{InGaAs}/\text{InP}$ . Возможно даль-  
нейшее уменьшение отрицательного смещения  
вольт-емкостной кривой при уменьшении темпе-  
ратуры пиролитического осаждения до 200 °С.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Будтолаева А. К., Хакушев П. Е., Чинарёва И. В. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 4. С. 351.
2. Ikeda M., Wakita K., Hata S. et al. // Electronics Letters. 1986. Vol. 19. No. 2. P. 61

3. Хлудков С. С. Диссертация ... докт. физ.- мат. наук. — Томск: ТГУ. 1989.
4. Машнин С. В. Дис. ... канд. физ.- мат. наук. — Томск: ТГУ. 1970.
5. Машин С. В., Подольских А. И., Потанина И. Е., Хлудков С. С. // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1972. Вып. 2. С. 158.
6. Боркун Л. П., Фукс Г. М., Хлудков С. С. // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1974. Т. 9. № 4. С. 729.
7. Бабченко Г. А., Гордиенко А. И., Мелев В. Г., Хлудков С. С. // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1983. Т. 19. № 3. С. 477.
8. Бабченко Г. А., Гордиенко А. И., Захаров Г. А. и др. // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1981. Т. 17. № 12. С. 2269.
9. Курносоев А. И., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Высш. школа. 1979. С. 367.
10. Андреев Д. С., Хакуашев П. Е., Чинарева И. В., Мармалюк А. А., Горлачук П. В. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 374.

## Using the thin SiO<sub>2</sub> films to form a guard ring in avalanche photodiodes based on InGaAs/InP

A. K. Budtolaev, P. E. Khakuashev, I. V. Chinareva, and L. A. Kosukhina

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

Received September 6, 2016

*Consideration is given to the p–n junction with different depths of occurrence, obtained by one-step diffusion. This transition is obtained by passing the admixture through a film of SiO<sub>2</sub> with a certain thickness. Experiments have been fulfilled on samples with SiO<sub>2</sub> films grown by different methods. The results showed that the samples with the SiO<sub>2</sub> film grown by the pyrolytic method at T = 250 have better characteristics compared to the rest. The C–V characteristics can be improved by reducing the temperature of pyrolytic deposition of SiO<sub>2</sub>.*

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

*Keywords:* SiO<sub>2</sub>, guard ring, p–n junction, diffusion, pyrolysis, InGaAs/InP, avalanche photodiode.

### REFERENCES

1. A. K. Budtolaeva, P. E. Khakuashev, and I. V. Chinareva, Usp. Prikl. Fiz. **3**, 351 (2015).
2. M. Ikeda, K. Wakita, S. Hata, et al., Electronics Letters **19** (2), 61 (1986).
3. S. S. Khludkov, Doctoral Dissertat in Mathematics and Physics (Tomsk, TGU, 1989).
4. S. V. Mashnin, Candidate's Dissertation in Mathematics and Physics (Tomsk, TGU, 1970).
5. S. V. Mashnin, A. I. Podolskikh, N. E. Potanina, and S. S. Khludkov, Elejtron. Tekhn. Ser. Materialy, No. 2, 158 (1972).
6. L. P. Borkun, G. M. Fuks, and S. S. Khludkov, Izv. AN SSSR. Ser. Neorg. Mater. **9**, 729 (1974).
7. G. A. Babchenko, A. I. Gordienko, V. G. Melev, and S. S. Khludov, Izv. AN SSSR. Ser. Neorg. Mater. **19**, 477 (1983).
8. G. A. Babchenko, A. I. Gordienko, Zakharov, et al., Izv. AN SSSR. Ser. Neorg. Mater. **17**, 2269 (1981).
9. A. I. Kurnosov and V. V. Yudin, *Technology for Production of Semiconductor Devices* (Vyssh. Shkola, Moscow, 1979) [in Russian].
10. D. S. Andreev, P. E. Khakuashev, I. V. Chinareva, A. A. Marmalyuk, and P. V. Gorlachuk, Usp. Prikl. Fiz. **1**, 374 (2013).