

06:07

## **Влияние ионной имплантации фосфора на оптические свойства тонких пленок диоксида германия, легированных ионами $\text{Er}^{3+}$ и $\text{Yb}^{3+}$**

© И.Н. Антонов, О.Н. Горшков, А.Н. Шушунов,  
А.П. Касаткин, А.Ю. Дудин, М.Е. Шенина

Нижегородский научно-исследовательский физико-технический институт  
ННГУ им. Н.И. Лобачевского  
E-mail: ivant@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 18 июля 2011 г.

Показано, что ионная имплантация фосфора в тонкие аморфные пленки диоксида германия, легированные ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ , может быть использована для усиления люминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  на длинах волн  $\sim 1.53 \mu\text{m}$ .

Тонкие пленки диоксида германия являются перспективным материалом оптоэлектроники и интегральной оптики в связи с возможностью создания в них оптически активных центров путем легирования редкоземельными элементами [1], формирования наведенного показателя преломления [2], нанокристаллов полупроводников [3] и металлов [4], в том числе с помощью ионного облучения. В работе [5] было показано, что оксиды редкоземельных элементов имеют ограниченную растворимость в кварцевом стекле, что приводит при увеличении их концентрации к образованию кластеров и, как следствие, к снижению эффективности преобразования накачки в сигнал. С целью усиления люминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  при создании эрбиевых волоконных усилителей/лазеров эффективным является легирование силикатных стекол оксидами фосфора и/или алюминия [6]. Такое усиление люминесценции является особенно важным при создании эрбиевых планарных усилителей/лазеров, поскольку в этом случае требуются концентрации ионов  $\text{Er}^{3+}$  с более высокими значениями [7].

В представленной работе изучено влияние концентрации фосфора, введенного методом ионной имплантации, на люминесценцию ионов

Дозы ионов фосфора для двух энергий, расчетный и измеренный уровни легирования пленки

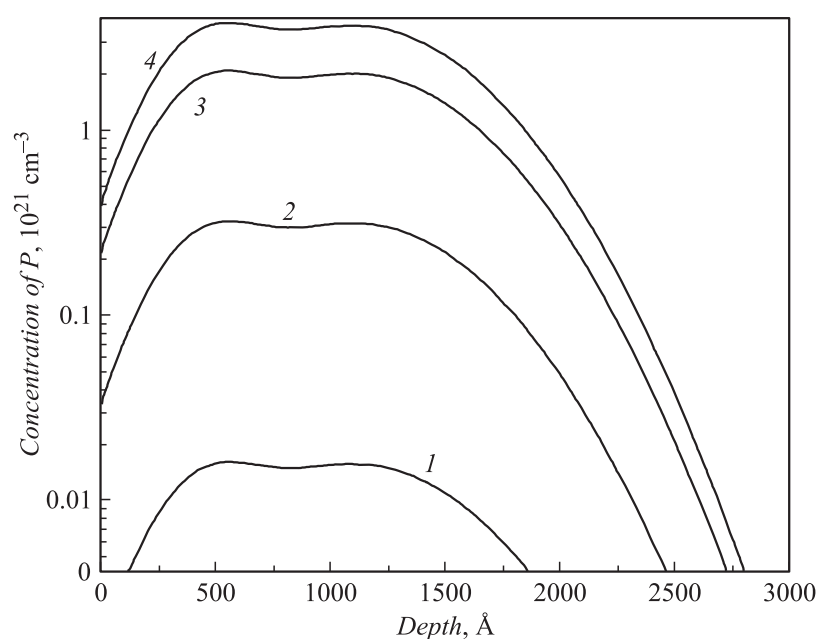
Доза ионов фосфора с энергией (см <sup>-2</sup> )		Соотношение атомов фосфора к атомам германия в пленке GeO <sub>2</sub> , легированной фосфором	
100 keV	40 keV	расчетное	измеренное
1.7 · 10 <sup>14</sup>	5.0 · 10 <sup>13</sup>	0.0013	—
3.4 · 10 <sup>15</sup>	1.0 · 10 <sup>15</sup>	0.013	—
2.2 · 10 <sup>16</sup>	7.0 · 10 <sup>15</sup>	0.068	0.087 ± 0.017
4.0 · 10 <sup>16</sup>	1.2 · 10 <sup>16</sup>	0.139	0.24 ± 0.028

Er<sup>3+</sup> (длины волн ~ 1.53 μm) и наведенный показатель преломления в тонких аморфных пленках диоксида германия, легированных ионами редкоземельных элементов (РЗЭ) Er<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup> (сенситизатор).

Пленки диоксида германия, легированные ионами Er<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup>, были сформированы на подложках из термически окисленного кремния методом ВЧ-магнетронного распыления при температуре подложки 400°C. Распыляемые мишени изготавливались из порошков оксидов состава: GeO<sub>2</sub> — 99.1 mol.%, Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0.72, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0.18 mol.%. Такой состав соответствует концентрациям ионов эрбия ~ 1 · 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup> и ионов иттербия ~ 4 · 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>, используемым при создании планарных лазеров [7]. Толщина пленок составляла 225 nm. Перед облучением пленки были отожжены в атмосфере кислорода при температуре 500°C в течение 1 h. Рентгенодифракционные исследования показали, что после отжига пленки оставались аморфными.

Для обеспечения равномерного профиля распределения имплантированных ионов по глубине пленок был проведен выбор доз и энергий ионов фосфора. В таблице для энергий ионов 40 и 100 keV приведены соответствующие дозы ионов, приводящие к распределению концентрации фосфора по глубине, представленному на рис. 1 (расчет по программе SRIM-2008). Для предотвращения нагрева образцов в процессе ионной имплантации плотность ионного тока в процессе облучения не превышала 10 μA/cm<sup>2</sup>.

С целью проверки соответствия реальных и расчетных значений концентрации фосфора в исследуемых пленках был выполнен рентге-

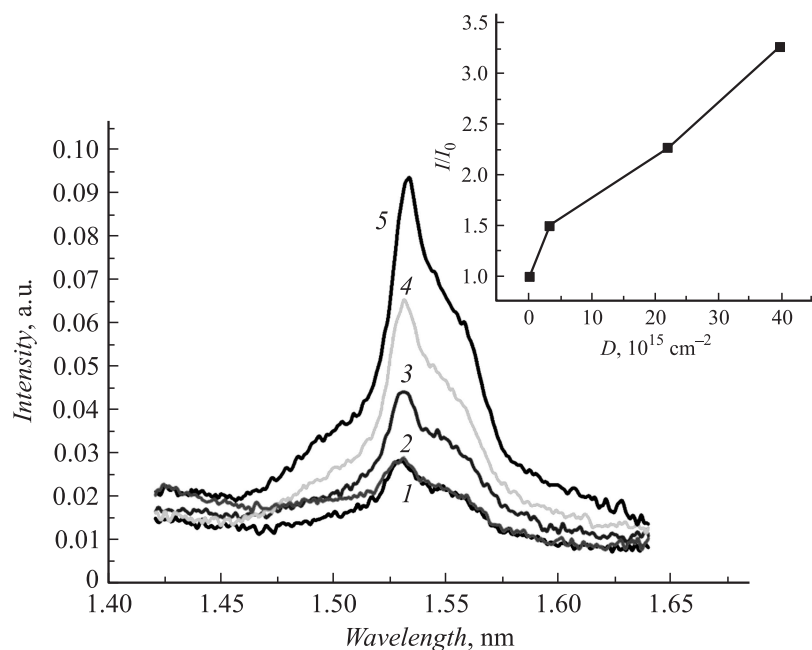


**Рис. 1.** Расчетное распределение концентрации ионов фосфора по глубине пленки  $\text{GeO}_2$  для режимов облучения, указанных в таблице.

новый микроанализ их элементного состава с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6490.

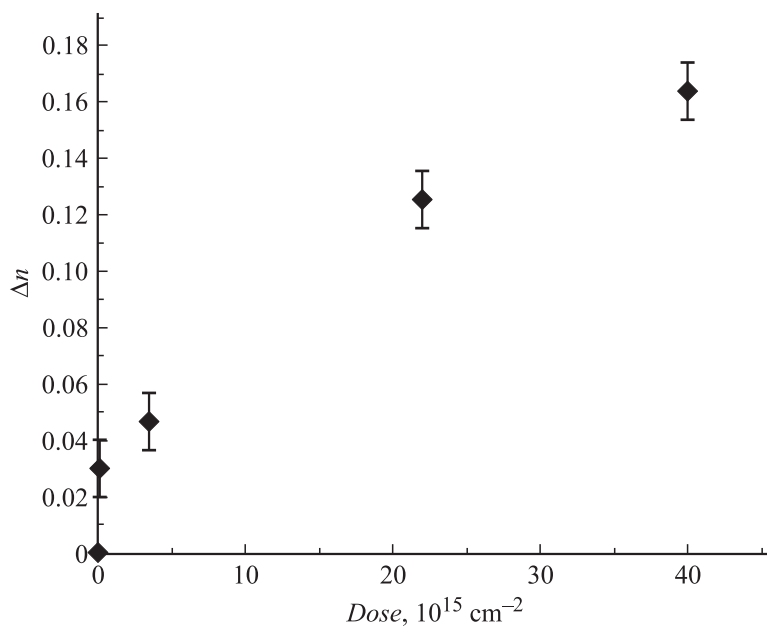
Результаты измерений для суммарных (при 40 и 100 keV) доз  $2.9 \cdot 10^{16}$  и  $5.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  (при меньших дозах концентрация фосфора в пленке была ниже уровня чувствительности используемой методики измерений) также приведены в таблице. При суммарных дозах облучения  $2.9 \cdot 10^{16}$  и  $5.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  расчетное содержание фосфора оказалось ниже измеренного. Это связано с распылением приповерхностного слоя пленки диоксида германия с пониженной концентрацией атомов фосфора в процессе ионной имплантации.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) исследуемых пленок при накачке полупроводниковым лазером с длиной волны  $0.987 \mu\text{m}$  были



**Рис. 2.** Спектры ФЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  в исходных пленках  $\text{GeO}_2$  (1) и легированных ионами фосфора с суммарными дозами  $2.2 \cdot 10^{14}$  (2),  $4.4 \cdot 10^{15}$  (3),  $2.9 \cdot 10^{16}$  (4) и  $5.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  (5). На вставке — зависимость относительной интенсивности ФЛ от дозы имплантированных ионов.

измерены с помощью установки на базе монохроматора МДР-23 фирмы „Ломо“, оснащенного плоской дифракционной решеткой  $600 \text{ Gr/mm}$  и фотоприемником марки „DILAS Co.“ DPD2000 P/B, соединенного с синхронным детектором. Из приведенных на рис. 2 данных следует, что легирование пленок фосфором с наименьшей суммарной дозой ( $2.2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) не приводит к заметному увеличению интенсивности фотолюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$ . В интервале суммарных доз  $4.4 \cdot 10^{15} - 5.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  возрастание интенсивности ФЛ происходит примерно линейно, и при максимальной дозе интенсивность фотолюминесценции увеличивается более чем в 3 раза. Аморфные матрицы диоксида германия и диоксида кремния являются изоструктурными



**Рис. 3.** Изменение показателя преломления пленок диоксида германия под действием облучения ионами фосфора.

аналогами. Поэтому можно считать, что легирование фосфором пленок диоксида германия, содержащих оптически активные ионы  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ , так же как и в силикатных стеклах [6], создает координационное окружение около этих ионов, которое препятствует их микрокластеризации и способствует улучшению люминесцентных свойств материала. При выбранных дозах в исследованных пленках на один ион РЗЭ приходилось 0.11, 1.1, 5.6, 11 атомов фосфора соответственно. Следует отметить, что наличие в матрице оборванных связей, возникших в результате ионного облучения, может также способствовать образованию указанного выше координационного окружения вокруг оптически активных ионов.

Морфология пленок, облученных в диапазоне указанных выше доз, изучалась с помощью атомно-силовой микроскопии (Торометрикс Ассигех ТМХ 2100). Шероховатость поверхности пленок меняется

незначительно и остается в пределах 0.8–1.57 nm, что позволяет использовать такие пленки для формирования планарных волноводных структур. Наведенный показатель преломления (НПП) в пленках при имплантации определялся с помощью спектроскопического эллипсометра PhE-102. Это позволило установить, что с ростом концентрации фосфора величина НПП растет в диапазоне 0.03–0.16 (рис. 3), что соответствует данным, полученным в случае силикатных стекол [8]. Такие изменения показателя преломления могут быть обусловлены введением в матрицу как атомов фосфора, так и радиационных дефектов [2] в процессе облучения. Детальное изучение роли указанных факторов требует проведения отдельных исследований.

Полученные результаты показывают, что ионная имплантация фосфора в тонкие аморфные пленки диоксида германия, легированные ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ , может быть использована при создании элементов и устройств интегральной оптики [9,10].

Работа выполнена в рамках ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“.

## Список литературы

- [1] Горшков О.Н., Антонов И.Н., Касаткин А.П., Шушуннов А.Н. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер. Физика твердого тела. 2010. № 5(2). С. 279–282.
- [2] Горшков О.Н., Антонов И.Н., Шенина М.Е., Дудин А.Ю., Касаткин А.П. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер. Физика твердого тела. 2010. № 4. С. 38–41.
- [3] Горшков О.Н., Дудин Ю.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 12. С. 39–46.
- [4] Антонов И.Н., Горшков О.Н., Дудин Ю.А., Шенина М.Е., Касаткин А.П., Камин В.А. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер. Физика твердого тела. 2009. № 4. С. 34–38.
- [5] Полоцкий А.Ю., Курков А.С., Яшков М.В., Бубнов М.М., Лихачев М.Е., Сысолятин А.А., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 6. С. 559–562.
- [6] Лихачев М.Е., Бубнов М.М., Зотов К.В., Медведков О.Н., Липатов Д.С., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 7. С. 633–638.

- 
- [7] *Veasey D.L., Funk D.S., Sanford N.A., Hayden J.S.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. N 6. P. 789–791.
- [8] *Липатов Д.С.* Автореф. канд. дис. Н. Новгород.: ИХВВ РАН, 2010. 22 с.
- [9] *Хандспенджер Р.* Интегральная оптика: Теория и технология / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 384 с.
- [10] Интегральная оптика / Под ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1978. 344 с.