

# Фоточувствительность германосиликатных световодов и заготовок, легированных неоднородно по сечению азотом

Ю.П.Яценко<sup>\*\*\*</sup>, В.М.Машинский<sup>\*</sup>, О.И.Медведков<sup>\*</sup>, О.Д.Сажин<sup>\*</sup>, Е.М.Дианов<sup>\*</sup>, В.Ф.Хопин<sup>\*\*</sup>, Н.Н.Вечканов<sup>\*\*</sup>, А.Н.Гурьянов<sup>\*\*</sup>

*Изучено влияние неоднородного распределения примеси азота на фоточувствительность германосиликатных световодов. Специально для этой цели методом MCVD изготовлены одномодовые световоды с различным чередованием слоев в сердцевине, остеклованных в азотной и кислородной атмосферах. В этих световодах записывались фотоиндуцированные изменения квадратичной нелинейной восприимчивости и показателя преломления. Показано, что эффективность записи зависит от радиального распределения германиевых кислородно-дефицитных центров, которым можно управлять на стадии остекловывания, используя неодинаковое по сечению легирование азотом.*

**Ключевые слова:** германосиликатные волоконные световоды, точечные дефекты, фотоиндуцированная квадратичная нелинейная восприимчивость, фоторефрактивный эффект.

## 1. Введение

Легирование германосиликатных световодов азотом даже при очень незначительных его концентрациях (меньше 0.1 %) повышает эффективность записи фотоиндуцированных решеток показателя преломления  $\Delta n$  и квадратичной нелинейной восприимчивости  $\chi^{(2)}$  [1, 2]. Такое влияние азота можно объяснить тем, что в сетке стекла он создает дополнительные стабильные ловушки фотоэлектронов при фотоионизации германиевых кислородно-дефицитных центров (ГКДЦ) [3]. Кроме того, вероятно модификация поливалентными атомами азота ближайшего окружения  $GeE'$ -центров, с которыми в обоих эффектах связывается фоточувствительность световодов [2]. В этом случае вследствие формирования дополнительных связей с фотоионизованными ГКДЦ, вызывающих пассивацию положительных зарядов и препятствующих их рекомбинации с фотоэлектронами, фоточувствительность стекла может увеличиваться.

С другой стороны, принимая во внимание очень малые концентрации азота в исследованной нами в [1, 2] серии световодов, можно предложить иное объяснение увеличению фоточувствительности, не связанное с модификацией фотоцентров азотом. Остекловывание и схлопывание заготовок в азотной атмосфере может привести не только к увеличению ГКДЦ, но и к их неоднородному распределению вследствие диффузии германия и азота. Неоднородное радиальное распределение ГКДЦ – основных донорных фотоцентров в германосиликатном стекле – может значительно повлиять на процессы переноса заряда (фотоионизацию, разделение заряда, рекомбинацию). Эти процессы существенны в первую очередь для формирования структуры  $\chi^{(2)}$ -решетки, но могут быть

важны также и для инициации процессов, происходящих на заключительной стадии формирования брэгговской решетки.

В связи с этим необходимо отметить недостаточное, на наш взгляд, освещение в литературе вопроса о том, какую роль играет радиальное распределение ГКДЦ в увеличении фоточувствительности германосиликатных световодов при введении и ряда других примесей, например фосфора, бора, олова. Так, известно, что легирование фосфором германосиликатного стекла оказывает положительное влияние на эффективность записи фотоиндуцированной  $\chi^{(2)}$ -решетки [4]. В то же время оно приводит к сильному подавлению ГКДЦ с полосой поглощения на  $\lambda = 242$  нм [5].

В настоящей работе мы исследовали фоточувствительность изготовленных нами световодов, в сердцевине которых имеются слои, остеклованные в азотной или кислородной атмосфере. Проведенное сравнение со стандартными световодами позволило выделить вклад неоднородного распределения ГКДЦ в механизмы формирования  $\chi^{(2)}$ -решетки и фотоиндуцированного показателя преломления в германосиликатном стекле.

## 2. Образцы

Серия одномодовых световодов была изготовлена с использованием метода MCVD, в котором остекловывание слоев сердцевины производилось в различных атмосферах ( $O_2$  и  $N_2O$ ) при одинаковых расходах хлоридов кремния и германия. При этом осаждение пористого слоя стекла и его остекловывание в кислороде осуществлялось за один проход горелки (стандартный режим), тогда как изготовление слоя с азотом – за два. В течение первого прохода происходило осаждение слоя пористого стекла в кислороде при пониженной температуре, а за второй проход – его проплавление (остекловывание) в атмосфере  $N_2O$ . Сердцевина одного из световодов (№ 913) была полностью остеклована в азотной атмосфере. При остекловывании сердцевины световода № 909 использовалась только стандартная кислородная атмосфера. Два типа световодов были изготовлены с двухслойной серд-

<sup>\*</sup>Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

<sup>\*\*</sup>Институт химии высококочистых веществ РАН, Россия, 603600 Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49

<sup>\*\*\*</sup>НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына при МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы

Табл.1. Экспериментальные образцы.

Номер образца	Молярное содержание GeO <sub>2</sub> в сердцевине (%)	Атмосфера остекловывания и схлопывания	Коэффициент поглощения на $\lambda = 242$ нм (дБ/мм)	Коэффициент поглощения на $\lambda = 266$ нм (дБ/мм)	Длина волны отсечки (нм)	$I_2/I_1^2$ ( $10^{-14}$ Вт <sup>-1</sup> ·см <sup>2</sup> )
909	6.5	O <sub>2</sub>	215	9	830	2.7
913	7.5	N <sub>2</sub> O	380	15	830	5.9
916	8.5	O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O	415	18	820	7.5
917	8	N <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub>	345	14	855	2.4

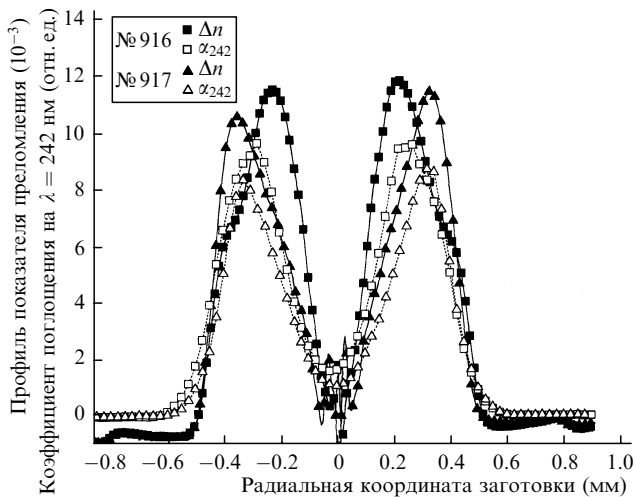


Рис.1. Профили показателя преломления сердцевина–оболочка и коэффициента поглощения на  $\lambda = 242$  нм для заготовок с двухслойной сердцевиной № 916 и 917. (Для наглядности здесь и на остальных рисунках экспериментальные точки соединены линиями).

цевинной. В одном из них (№ 916) центральный слой был изготовлен в атмосфере N<sub>2</sub>O, а периферийный – в атмосфере O<sub>2</sub>. В другом световоде (№ 917) порядок слоев был противоположным, т. е. остеклованный в N<sub>2</sub>O слой был на периферии сердцевины. Слои имели одинаковую толщину. Мы полагаем, что содержание азота в стекле не превышало 0.1 % [3].

В УФ области наблюдался обычный для германо-силикатного стекла спектр поглощения. Длины волн отсечки этих световодов и коэффициенты поглощения на  $\lambda = 242$  нм представлены в табл.1. Из нее следует, что заготовки (и световоды), остеклованные в атмосфере азота, мало различаются по концентрации ГКДЦ, которая, в то же время, определено больше, чем в стандартной заготовке № 909. Профили показателя преломления и концентрации ГКДЦ, представленной коэффициентом поглощения на  $\lambda = 242$  нм для заготовок с двухслойной сердцевиной (№ 916 и 917), показаны на рис.1. Каждый слой занимает половину радиуса заготовки, поэтому нетрудно заметить, что максимумы обоих профилей находятся в слоях, остеклованных в атмосфере азота.

### 3. Экспериментальные результаты

В изготовленных нами световодах мы исследовали генерацию фотоиндуцированной второй гармоники (ВГ). Для записи  $\chi^{(2)}$ -решетки использовалась стандартная процедура: совместно с ИК излучением с  $\lambda = 1064$  нм в световод подавалось затравочное излучение с  $\lambda = 532$  нм. Лазер на Nd:YAG работал в режиме одновременной модуляции добротности и синхронизации мод. Длитель-

ность импульсов составляла 100 пс при частоте повторения 76 МГц, длительность огибающей пуга – 200 нс, частота повторения пугов – 1.2 кГц. Типичный рост  $\chi^{(2)}$  в зависимости от поглощенной энергии излучения на  $\lambda = 266$  нм показан на рис.2. Здесь мы использовали нашу модель [2, 6], в соответствии с которой возбуждение ГКДЦ производится УФ излучением, образующимся внутри световода в нелинейном процессе смешения волн на кубической нелинейной восприимчивости  $\chi^{(3)}$  ( $4\omega = \omega + \omega + 2\omega$ ). При определении зависимостей  $\chi^{(2)}$  от дозы излучения использовались расчетные значения интенсивности излучения с  $\lambda = 266$  нм в соответствии с процедурой, описанной в [2].

При одинаковых условиях облучения световод № 916 (с центральным слоем, остеклованным в атмосфере N<sub>2</sub>O) имел наиболее высокую эффективность записи  $\chi^{(2)}$ -решетки по сравнению с остальными. Световод № 917 (с периферийным слоем, остеклованным в N<sub>2</sub>O), напротив, показал даже меньшую эффективность записи, чем чисто германо-силикатный световод № 909.

Чтобы найти различия в эффективностях фотоцентров для образцов с двухслойной сердцевиной, мы записывали фотоиндуцированную ВГ с шагом 20 мкм по диаметру в пластинках, вырезанных из заготовок № 916 и 917 (рис.3). Профиль интенсивности записываемой ВГ, представленный на рис.3, довольно точно повторяет профиль измеренного поглощения на  $\lambda = 242$  нм (рис.1). Таким образом, в обоих образцах наиболее фоточувствительными являются слои с азотом, имеющие максимальную концентрацию ГКДЦ.

Для того чтобы определить, насколько существенна в данной серии образцов модификация ГКДЦ азотом, мы

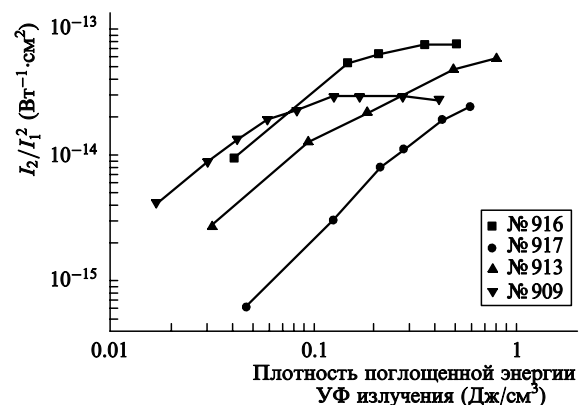


Рис.2. Типичный рост  $\chi^{(2)}$ -решетки в световодах № 916, 917, 913 и 909 в зависимости от плотности поглощенной энергии излучения с  $\lambda = 266$  нм. Пиковая мощность излучения первой гармоники при записи  $P_1 = 10 - 11$  кВт, затравочной второй гармоники  $P_2 = 60 - 70$  Вт;  $I_1$  – пиковая интенсивность ИК излучения при считывании,  $I_2$  – пиковая интенсивность фотоиндуцированной ВГ.

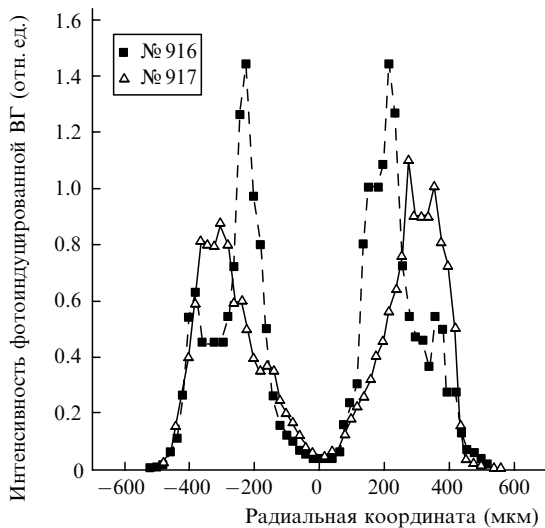


Рис.3. Радиальное распределение интенсивности фотоиндуцированной ВГ в заготовках №916 и 917 (толщина образцов 110 мкм); ИК излучение с  $\lambda = 1064$  нм и затравочное излучение с  $\lambda = 532$  нм (пиковые мощности 14 кВт и 240 Вт соответственно) фокусировались в заготовку с помощью  $20\times$ -объектива, время экспозиции 1 мин.

последовательно облучали образцы (одну половину заготовок) разными дозами излучения AgF-лазера ( $\lambda = 193$  нм). После каждой дозы в одинаковых условиях по диаметру образца записывалась фотоиндуцированная ВГ (рис.4).

С увеличением дозы излучения на  $\lambda = 193$  нм (в интервале  $1 \text{ Дж/см}^2 - 5 \text{ кДж/см}^2$ ) интенсивность фотоиндуцированной ВГ в облученной части образца уменьшалась. При малых дозах (менее  $100 \text{ Дж/см}^2$ ) эта интенсивность в облученной части заготовки была больше, а при дозах, превышающих  $500 \text{ Дж/см}^2$ , – меньше, чем в необлученной части образца (рис.5). Потеря фоточувствительности (двукратная при дозе  $500 \text{ Дж/см}^2$  и четырехкратная при дозах  $5 \text{ кДж/см}^2$ ) в образцах №916 и 917 была приблизительно одинаковой. В каждом из них профиль фотоиндуцированной ВГ мало изменялся пос-

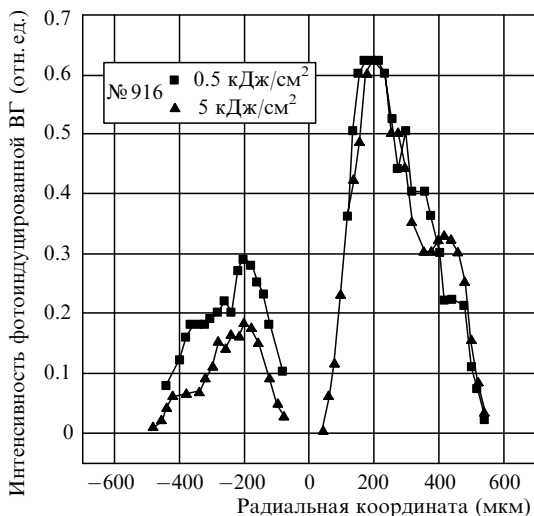


Рис.4. Радиальное распределение интенсивности фотоиндуцированной ВГ в заготовке №916. Перед каждым сканированием фотоиндуцированной ВГ одна половина сердцевин заготовки (на этом и на рис.7 соответствует отрицательной шкале расстояний слева от центра заготовки) предварительно облучалась излучением с  $\lambda = 193$  нм (суммарные дозы 0.5 и 5 кДж).

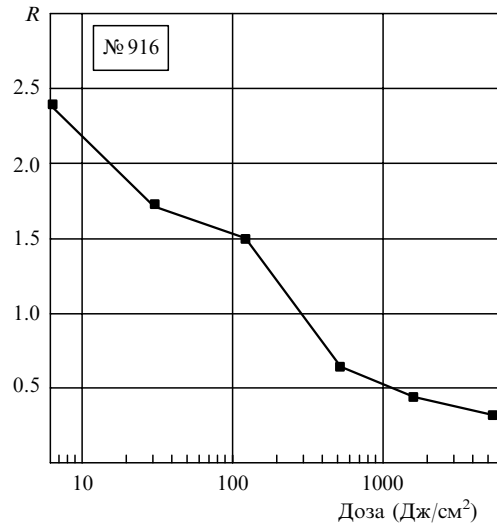


Рис.5. Интенсивность фотоиндуцированной ВГ в заготовке №916 в зависимости от дозы излучения с  $\lambda = 193$  нм;  $R$  – отношение интенсивности фотоиндуцированной ВГ в облученной части заготовки к ее интенсивности в необлученной части, усредненное по профилю заготовки.

ле облучения. В этом можно убедиться, в частности, из рис.4, где для световода №916 представлены профили фотоиндуцированной ВГ до и после облучения. Поскольку фотоцентры в слоях, остеклованных в азотной и кислородной атмосферах, реагировали на облучение одинаково, можно заключить, что лишь незначительное их количество могло быть модифицировано азотом. Поэтому основная причина изменения фоточувствительности, которую следует связать с азотом в этой серии образцов, – это увеличение концентрации ГКДЦ при остекловывании в азотной атмосфере.

Интересно сравнить этот результат с изменениями в спектрах поглощения, наблюдаемыми после облучения излучением с  $\lambda = 193$  нм (рис.6). Увеличение поглощения вблизи полос на 200, 213 и 281 нм, традиционно приписываемых соответственно  $\text{GeE}'$ -,  $\text{Ge}(2)$ - и  $\text{Ge}(1)$ -центрам, с

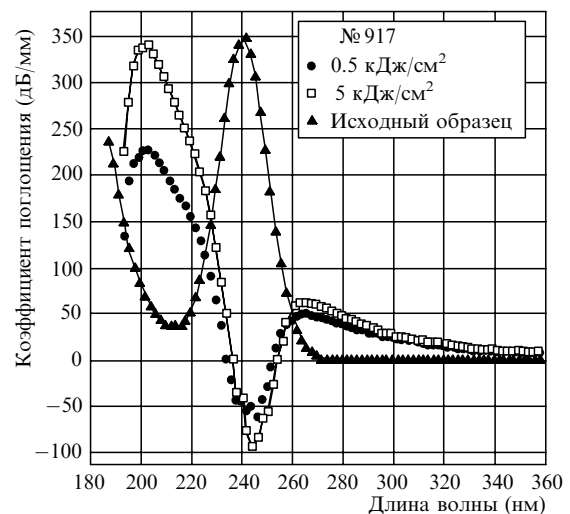


Рис.6. Исходное и наведенное ( $\lambda = 193$  нм) поглощение в заготовке №917 (толщина образца 110 мкм) при различных дозах облучения. Спектр наведенного поглощения нормировался на эффективную глубину  $d$  проникновения излучения с  $\lambda = 193$  нм ( $d = 1/\alpha_{193} = 26$  мкм).

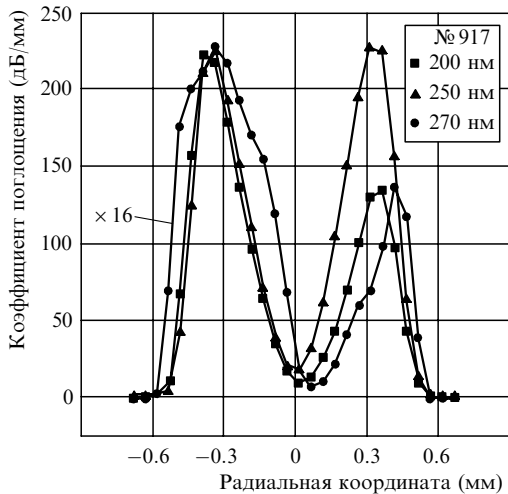


Рис. 7. Радиальное распределение поглощения на  $\lambda = 200, 250$  и  $270$  нм после облучения одной половины сердцевинной заготовки № 917 излучением с  $\lambda = 193$  нм (доза  $0.5$  кДж/см $^2$ ). График для  $270$  нм растянут в 16 раз.

одновременным фотообесцвечиванием полосы на  $\lambda = 242$  нм (ГКДЦ) свидетельствует о том, что излучение с  $\lambda = 193$  нм при дозах, соответствующих фотоиндуцированным изменениям показателя преломления вплоть до  $\Delta n = 10^{-3}$ , генерирует большое количество положительных и отрицательных зарядов. Точное определение концентраций этих центров по величине поглощения в соответствующих полосах оказалось затруднительным вследствие большой оптической плотности образцов, минимальная толщина которых определялась условиями записи  $\chi^{(2)}$ -решетки. Тем не менее из спектра, представленного на рис.6, мы оценили, что концентрация  $GeE'$ - и  $Ge(2)$ -центров, с которыми мы ассоциируем положительный заряд, и концентрация отрицательно заряженных  $Ge(1)$ -центров составляют  $(1 - 10) \times 10^{18}$  см $^{-3}$ . Обращает на себя внимание насыщение поглощения в области полосы  $Ge(1)$ -центров при дозах, больших  $500$  Дж/см $^2$ .

Как видно из рис.7, имеются существенные различия в радиальных профилях поглощения на  $200$  нм ( $GeE'$ ) и  $270$  нм ( $Ge(1)$ ) после облучения. Если первый практически

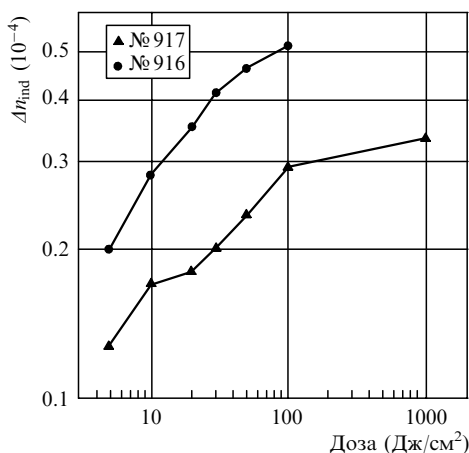


Рис. 8. Фотоиндуцированное изменение показателя преломления, измеренное в одномодовых световодах № 916 и 917 с помощью интерферометра, образованного двумя длиннопериодными решетками, в зависимости от экспонируемой дозы излучения с  $\lambda = 244$  нм. Интенсивность излучения  $10$  Вт/см $^2$ .

совпадает с профилем исходных ГКДЦ, то второй значительно шире. Уширение профиля поглощения на  $270$  нм свидетельствует о возможном разделении заряда из-за диффузии фотоэлектронов, освободившихся при фотоионизации исходных ГКДЦ.

В световодах с двухслойной сердцевинной мы записали также решетку  $\Delta n$  излучением второй гармоники непрерывного  $Ag^+$ -лазера ( $\lambda = 244$  нм). Для измерения наведенного показателя преломления использовалась интерферометрическая методика [7]. Как и при записи фотоиндуцированной ВГ, эффективность записи  $\Delta n_{ind}$  в световоде № 916 оказалась выше (рис.8). Заметим, что ранее мы уже наблюдали корреляцию эффективности записи решеток  $\Delta n$  и  $\chi^{(2)}$  в германосиликатных световодах, различающихся составом примесей [2].

#### 4. Обсуждение

Мы полагаем, что представленные результаты отражают ту роль, которую при формировании решеток  $\chi^{(2)}$  и, возможно,  $\Delta n$  играет распределение германиевых доноров (ГКДЦ) и ловушек (четырёхкоординированного германия, образующего при захвате фотоэлектрона  $Ge(1)$ -центр). Увеличение фоточувствительности германосиликатных световодов с такими примесями, как азот, может быть связано не только с непосредственным участием этой примеси в процессах переноса заряда. С точки зрения разделения заряда более важной является роль азота в повышении концентрации ГКДЦ и формировании благоприятного радиального распределения ГКДЦ и германиевых ловушек в процессе синтеза заготовок. Из наших результатов следует, что благоприятное распределение означает относительное увеличение концентрации доноров ГКДЦ в центре сердцевинной и увеличение концентрации ловушек вблизи границы сердцевинной – оболочка. Сильное влияние радиального распределения фотоцентров свидетельствует в пользу выбора модели когерентного фототока [8] для механизма формирования  $\chi^{(2)}$ -решетки. (Модель основывается на концепции большого пространственного разделения заряда, размеры которого сравнимы с поперечными размерами световодной моды.)

Проведем в рамках этой модели оценку электростатического поля, формирующего  $\chi^{(2)}$ -решетку, для световодов с двухслойной сердцевинной, имеющих одинаковые толщины слоев и идеальное разделение доноров и ловушек по слоям.

В модели когерентного фототока насыщенное значение амплитуды  $\chi^{(2)}$ -решетки и электростатического поля  $E = \chi^{(2)}/3\chi^{(3)}$  определяется из равенства когерентного фототока  $j_{coh}$  и тока проводимости  $j_{cond}$ . При записи выражения для когерентного фототока учтем, что он вызывает радиально асимметричное разделение заряда в результате фотоионизации ГКДЦ. Следовательно, он должен зависеть от интеграла перекрытия радиального распределения концентрации ГКДЦ и поперечного сечения УФ излучения, которое их фотоионизирует. Примем во внимание, что обратный ток проводимости  $j_{cond} = \sigma E$  появляется в результате фотоионизации заполненных ловушек ( $Ge(1)$ ), образующихся при асимметричном разделении заряда, и должен зависеть от интеграла перекрытия поперечного сечения УФ излучения и радиального распределения концентрации четырехкоординированного германия ( $GeO_2$ ), предшественника  $Ge(1)$ . Тогда

электростатическое поле  $E = j_{\text{coh}}/\sigma$  на стадии насыщения имеет следующий вид:

$$E = \frac{\beta_1 N_{\text{GODC}}^{\text{exc}}(f_d, I_{\text{UV}}, N_{\text{GODC}}) I_{\omega} I_{2\omega}^{1/2} \cos(\Delta kz)}{\sigma_1 N_{\text{Ge}(1)}^{\text{ph}}(f_{\text{tr}}, I_{\text{UV}}, N_{\text{GeO}_2})}$$

Здесь  $\beta_1$  и  $\sigma_1$  – фотовольтаические константы;  $I_{\omega}$  и  $I_{2\omega}$  – интенсивности ИК излучения и затравочной второй гармоники при записи  $\chi^{(2)}$ -решетки;  $\Delta k = 2(\omega/c)(n_{2\omega} - n_{\omega})$ ;  $n_{\omega}$ ,  $n_{2\omega}$  – показатели преломления сердцевинного световода на частотах ИК излучения и его второй гармоники;  $\omega$  – частота ИК излучения;  $z$  – аксиальная координата;  $N_{\text{GODC}}^{\text{exc}}(f_d, I_{\text{UV}}, N_{\text{GODC}})$ ,  $N_{\text{Ge}(1)}^{\text{ph}}(f_{\text{tr}}, I_{\text{UV}}, N_{\text{GeO}_2})$  – концентрации возбужденных ГКДЦ и фотоионизованных Ge(1) как функции интенсивности УФ излучения  $I_{\text{UV}}$ , концентраций их предшественников  $N_{\text{GODC}}$  и  $N_{\text{GeO}_2}$ , а также интегралов перекрытия  $f_d$  и  $f_{\text{tr}}$  соответственно.

Как и в наших предыдущих работах [2, 6], будем полагать, что при записи решетки  $\chi^{(2)}$  фотоионизация ГКДЦ происходит в результате двухступенчатого процесса. Вначале УФ излучение четвертой гармоники ( $\lambda = 266$  нм), генерируемое внутри световода в нелинейном процессе на  $\chi^{(3)}$  ( $4\omega = \omega + \omega + 2\omega$ ), возбуждает ГКДЦ на синглетный ( $S_1$ ) и триплетный ( $T_1$ ) уровни. Затем ИК излучение ( $\lambda = 1064$  нм) в двухфотонном процессе и его вторая гармоника ( $\lambda = 532$  нм) в однофотонном процессе фотоионизируют их из возбужденных уровней. Интерференция этих двух каналов фотоионизации дает асимметричный когерентный фототок, формирующий периодическое электростатическое поле и структуру решетки  $\chi^{(2)}$ . Мы будем полагать, что на стадии насыщения почти все фотоионизованные электроны находятся на германиевых ловушках Ge(1). Будем полагать также, что излучение с  $\lambda = 266$  нм, попадающее в полосу поглощения Ge(1)-центров (281 нм), вносит основной вклад в фотоионизацию Ge(1) в однофотонном процессе.

Тогда в предположении гауссова профиля радиального распределения концентраций доноров и ловушек электростатическое поле можно записать в виде

$$E = \frac{\beta_1 f_1 N_{\text{GODC}} I_{\omega} I_{2\omega}^{1/2} \cos(\Delta kz)}{\sigma_1 f_2 N_{\text{Ge}(1)}},$$

где  $N_{\text{GODC}}$  и  $N_{\text{Ge}(1)}$  – концентрации доноров и заполненных ловушек в максимумах их радиальных распределений;  $f_1 = \exp[-2\Delta r_d^2/(\omega_{4\omega}^2 + \omega_d^2)]$ ;  $f_2 = \exp[-2\Delta r_{\text{tr}}^2/(\omega_{4\omega}^2 + \omega_{\text{tr}}^2)]$ ;  $\Delta r_d$ ,  $\omega_d$  и  $\Delta r_{\text{tr}}$ ,  $\omega_{\text{tr}}$  – радиальные смещения максимумов концентраций по отношению к гауссовой моде четвертой гармоники и полуширины радиальных распределений концентраций для ГКДЦ и Ge(1) соответственно;  $\omega_{4\omega}$  – полуширина гауссовой моды для излучения четвертой гармоники.

В случае исходного однородного распределения ГКДЦ и GeO<sub>2</sub> (предшественников Ge(1)-центров) радиальное распределение фотоионизованных доноров совпадает с гауссовой модой четвертой гармоники, а максимум распределения Ge(1) смещен к периферии луча в направлении, определяемом поляризацией интерферирующих фотоионизирующих излучений. В силу однофотонности процессов фотоионизации ловушек и одинаковых условий для электронов в зоне проводимости радиальный профиль Ge(1) на стадии насыщения будет повторять профиль фотоионизованных ГКДЦ. Смещение максимума распределения Ge(1) в результате многих актов фотоионизации и рекомбинации будет примерно равным полу-

ширине гауссовой моды четвертой гармоники ( $\Delta r_d \approx 0$ ,  $\omega_d \approx \omega_{4\omega}$ ,  $\Delta r_{\text{tr}} \approx \omega_{4\omega}$ ,  $\omega_{\text{tr}} \approx \omega_{4\omega}$  и  $f_1/f_2 = e^1$ ).

Положим, что в световодах с двухслойной сердцевинной максимум концентрации доноров находится в центральном слое, а максимум концентрации ловушек – в периферийном. Сечение гауссовой моды четвертой гармоники, рожденной в нелинейном процессе с интенсивностью  $I_{4\omega} \sim (\chi^{(3)} I)^2 I_{\omega}^2 I_{2\omega}$  ( $l$  – когерентная длина), практически совпадает с размером центрального слоя ( $\omega_{4\omega} = \omega_{\omega}/\sqrt{3}$ , где  $\omega_{\omega}$  – полуширина гауссова сечения низшей световодной моды, в которой распространяется ИК излучение). В этом случае  $\omega_d \approx \omega_{4\omega}$ ,  $\Delta r_d \approx 0$ ,  $\omega_{\text{tr}} \approx \omega_{4\omega}$ ,  $\Delta r_{\text{tr}} \approx 2\omega_{4\omega}$ ,  $f_1/f_2 \approx e^4$ , и мы имеем увеличение электростатического поля в сравнении с однородным распределением в  $E_{\text{NU}}/E_{\text{U}} = e^3 \approx 20$  раз. Для противоположного расположения максимумов концентраций доноров и ловушек в слоях  $\omega_d \approx \omega_{4\omega}$ ,  $\Delta r_d \approx 2\omega_{4\omega}$ ,  $\omega_{\text{tr}} \approx \omega_{4\omega}$ ,  $\Delta r_{\text{tr}} \approx \omega_{4\omega}$ ,  $f_1/f_2 \approx e^{-3}$  и уменьшение электростатического поля по сравнению с однородным распределением составляет  $E_{\text{NU}}/E_{\text{U}} = e^{-4} \approx 0.02$ .

В наших экспериментах со световодами № 916 и 917 с двухслойной сердцевинной была получена значительно меньшая разница в эффективностях записи фотоиндуцированной ВГ ( $(I_2)_{916}/(I_2)_{917} = (\chi_{916}^{(2)})^2/(\chi_{917}^{(2)})^2 = 3.1$ ). Как видно из рис. 1, в заготовках с двухслойной сердцевинной в распределении  $\Delta n(r)$  имеется большой центральный провал и между профилями показателя преломления и поглощения ГКДЦ существует лишь небольшое различие. Применяя наш анализ к измеренным в заготовках для световодов № 916 и 917 профилям показателя преломления и поглощения ГКДЦ (рис. 1), мы получили близкие к экспериментальным данным расчетные значения для отношения интенсивностей ВГ  $(f_1/f_2)_{916} \approx e^{0.696}$ ,  $(f_1/f_2)_{917} \approx e^{0.171}$ ,  $E_{916}/E_{917} = 1.69$  и  $(\chi_{916}^{(2)})^2/(\chi_{917}^{(2)})^2 = 2.9$ .

Таким образом, чтобы значительно увеличить электростатическое поле в световодах с двухслойной сердцевинной, необходимо обеспечить более четкое разделение центрального слоя, содержащего максимум концентрации ГКДЦ (остеклован в азотной атмосфере), и периферийного слоя, содержащего максимум концентрации GeO<sub>2</sub> (остеклован в кислородной атмосфере). Мы полагаем, что достичь здесь желаемого результата можно было бы путем очень точного регулирования концентрации хлоридов и температуры на разных стадиях технологического процесса.

Увеличение интенсивности фотоиндуцированной ВГ после облучения УФ излучением, которое мы наблюдали в заготовках при малых дозах излучения с  $\lambda = 193$  нм, – это ожидаемый эффект. В более ранних работах [9, 10] наблюдалось повышение эффективности ВГ после предварительного облучения световодов излучением с  $\lambda = 266$  [9] и 351.1 нм [10]. Принимая во внимание намного более низкую эффективность разрушения ГКДЦ УФ излучением на этих длинах волн в сравнении с излучением на  $\lambda = 193$  нм, используемые в этих работах дозы (мощность излучения 0.1–1 мВт, время облучения – десятки секунд) соответствуют очень малым дозам излучения с  $\lambda = 193$  нм. Наиболее вероятное объяснение увеличения ВГ при малых дозах УФ излучения – появление дополнительного канала переноса заряда когерентным фототоком, а именно фотоионизации и переориентации ловушек Ge(1), образованных излучением с  $\lambda = 193$  нм. Фотоионизация Ge(1) излучением с  $\lambda = 266$  нм очень эффективна [11], так что в сравнении с необлученным образцом

суммарная эффективная фотоэлектрическая константа для когерентного фототока будет выше.

В экспериментах с использованием излучения с  $\lambda = 248$  нм KrF-лазера было показано, что концентрация Ge(1)-центров достигает уровня насыщения при дозах  $1 - 10$  Дж/см<sup>2</sup> [11, 12]. При больших дозах происходит разрушение ГКДЦ с преимущественным формированием GeE'-центров [13]. Разрушение ГКДЦ в этом случае может происходить путем перестройки структуры без фотоионизации [14]. Таким образом, уменьшение интенсивности фотоиндуцированной ВГ после больших доз облучения излучением с  $\lambda = 193$  нм можно связать с потерей эффективности фотоионизации ГКДЦ вследствие уменьшения концентрации донорных центров и с насыщением наведенных Ge(1)-центров, которые могут быть переориентированы.

С точки зрения механизма формирования решетки  $\Delta n$  интересно отметить также тот факт, что при типичных для записи  $\Delta n$  суммарных дозах излучения с  $\lambda = 193$  нм (несколько кДж/см<sup>2</sup>) после разрушения ГКДЦ появляется более  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> положительных и отрицательных зарядов, разделенных пространственно из-за неоднородного распределения ГКДЦ. Наблюдаемое значительное уширение (порядка 100 мкм) профиля этой полосы в заготовках может объясняться концентрационными градиентами ГКДЦ вследствие мелкомасштабных (~1 мкм) неоднородностей германосиликатного стекла, не видных на рис. 1 и 7 [15]. В световодах с неоднородным распределением примесей концентрационные градиенты ГКДЦ возрастают приблизительно на два порядка по сравнению с измеренными в заготовках, и роль пространственного разделения зарядов в инициации процессов структурной перестройки на заключительной стадии формирования решетки  $\Delta n$  может быть существенной.

Более эффективная запись  $\chi^{(2)}$ - и  $\Delta n$ -решеток в одном и том же световоде с двухслойной сердцевиной также может свидетельствовать о влиянии ГКДЦ и разделения заряда на формирование  $\Delta n$ . Однако в изготовленных нами образцах профили поглощения ГКДЦ и GeO<sub>2</sub> различаются очень мало. Следовательно, нельзя исключить, что окончательно сформированный профиль фотоиндуцированного  $\Delta n$  определяется фотопроцессами, зависящими от концентрации германия и не связанными с разделением заряда.

Вопрос о том, насколько оптимальные радиальные распределения ГКДЦ и GeO<sub>2</sub> коррелируют при записи  $\Delta n$ - и  $\chi^{(2)}$ -решеток, требует дальнейшего изучения и, в частности, изготовления образцов с лучшим разделением германиевых донорных и акцепторных центров.

## 5. Заключение

В изготовленной нами серии германосиликатных заготовок и световодов, неоднородно легированных азо-

том, обнаружена зависимость эффективности записи  $\chi^{(2)}$ - и  $\Delta n$ -решеток от радиального распределения фотоцентров. Трехкратное увеличение интенсивности фотоиндуцированной ВГ, полученное в световоде с двухслойной сердцевиной, связано не с модификацией фотоцентров азотом, а с перераспределением ГКДЦ и германиевых ловушек. Показано, что ее можно существенно повысить при условии более четкого разделения германиевых донорных и акцепторных центров на стадии изготовления заготовок.

Уменьшение фотоиндуцированной ВГ после больших доз излучения с  $\lambda = 193$  нм указывает на разрушение ГКДЦ путем структурной перестройки без фотоионизации.

Наблюдаемые в спектрах интенсивные полосы поглощения Ge(1)-, Ge(2)- и GeE'-центров, которые имеют несовпадающие ширины по радиусу заготовок, при типичных для фоторефрактивного эффекта дозах излучения с  $\lambda = 193$  нм свидетельствуют о большой (свыше  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>) концентрации положительных и отрицательных зарядов и о возможной важной роли разделения зарядов в инициации процессов формирования решетки  $\Delta n$  на заключительном этапе.

Авторы выражают признательность В.Б.Неуструеву за поддержку работы и критические замечания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 01-02-17751 и 00-15-96650.

1. Dianov E.M., Golant K.M., Mashinsky V.M., Medvedkov O.I., Nikolov I.V., Sazhin O.D., Vasiliev S.A. *Electron. Lett.*, **33**, 1334 (1997).
2. Dianov E.M., Guryanov A.N., Khopin V.F., Mashinsky V.M., Medvedkov O.I., Sazhin O.D., Vasiliev S.A., Vechkanov N.N., Yatsenko Yu.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4083**, 144 (2000).
3. Сулимов В.Б. *Автореф. докт. дисс.* (М., ИОФАН, 1997).
4. Saifi M.A., Andrejco M.J. *Opt. Lett.*, **13**, 773 (1988).
5. Dong L., Pinkstone J., Russell P.St.J., Payne D.N. *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**, 2106 (1994).
6. Дианов Е.М., Корниенко Л.С., Яценко Ю.П. *Квантовая электроника*, **23**, № 7, 652 (1996).
7. Dianov E.M., Vasiliev S.A., Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Protopyopov V.N. In: *Proc. ECOC'96* (Oslo, Norway, 1996, v.1, p. 65).
8. Dianov E.M., Kasansky P.G., Krautschik C., Stepanov D.Yu. *Sov. Lightwave Commun.*, **1**, 381 (1991).
9. Carvalho I.C.S., Margulis W. *Opt. Lett.*, **16**, 1487 (1991).
10. Driscoll T.J., Lavandy N.M. *Opt. Lett.*, **17**, 571 (1992).
11. Neustruev V.B., Dianov E.M., Kim V.M., Mashinsky V.M., Romanov M.V., Guryanov A.N., Khopin V.F., Tikhomirov V.A. *Fibers and Integrated Optics*, **8**, 143 (1989).
12. Fujimaki M., Yagi K., Okhi Y., Nishikava H., Awazu K. *Phys. Rev. B*, **53**, 9859 (1996).
13. Nishii J., Fukumi K., Yamaka H., Kawamura K., Hosono H., Kawazoe H. *Phys. Rev. B*, **52**, 1661 (1995).
14. Essid M., Albert J., Brebner J.L., Awazu K. *J. of Non-Cryst. Solids*, **246**, 39 (1999).
15. Dianov E.M., Mashinsky V.M., Neustruev V.B., Sazhin O.D., Guryanov A.N., Khopin V.F., Vechkanov N.N., Lavrishchev S.V. *Opt. Fiber Technology*, **3**, 77 (1997).