Uzbek Journal of Physics

Vol.22(№1) 2020 PP.20-27

НАПРАВЛЕННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ДВУЖИЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА: ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Э.А. Захидов[1], И.И. Тажибаев[1,2], Ш.К. Нематов[2], М.Х. Имомов[1]

[1]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан
[2]Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан
ilhom.tojiboyev@gmail.com
(Получена 26.07.2019)

Нуртолали тармоқлагичларда ёруғлик тўлқинларини ўзаро таъсирлашишларини назарий таҳлил қилиш ва тажрибада ўрганиш оптик алоқа нуртолали тармоқлагичлари тайёрлашнинг оптималь шартларини аниқлаш имконини берди. Нуртола материалдаги кучланиш ҳисобига ҳосил бўлувчи қўшимча йўқотишларнинг турли температураларда чўзиш тезлигига боғлиқлиги аниқланди.

Теоретический анализ и экспериментальное изучение взаимодействия световых волн в волоконном ответвителе позволили выявить оптимальные условия изготовления волоконных ответвителей для систем оптической связи. Установлена зависимость избыточных оптических потерь за счет напряжения в материале волокна от скорости вытяжки при различных температурах сплавления**.**

Theoretical analysis and experimental study of the interaction of light waves in a fiber coupler revealed the optimal conditions for the manufacture of fiber couplers for optical communication systems. The dependence of excess optical losses, due to the voltage in the fiber material, on the drawing speed at various fusion temperatures is established.

I. ВВЕДЕНИЕ

Волоконные ответвители как ключевые элементы систем оптической связи и обработки информации, а также волоконных датчиков, выполняют функцию когерентного разветвления и/или соединения световых волн [1]. Они используются при мультиплексировании/демультиплексировании света по длинам волн, спектральном фильтровании и поляризационно-селективном разделении света [2].

Принцип работы волоконного ответвителя заключается в том, что световые волны, распространяющиеся по двум волокнам как независимые волны, при достаточном сближении их световедущих жил, когда световые поля в них начинают частично перекрывать друг друга, могут перекачиваться из одного волокна в другое. Волоконные ответвители изготовляют в основном двумя способами: либо удалением части светоотражающих оболочек на определённом участке двух волокон путем их полировки с последующим сближением (склеиванием) этих волокон. Либо посредством высокотемпературного сплавления (например, в поле дугового электрического разряда) и одновременной вытяжки двух плотно расположенных волокон, когда, из-за уменьшения диаметров оболочек, сближаются световедущие жилы этих волокон [3, 4]. Если в первом случае можно точно установить степень сближения световедущих жил волокон за счет контроля толщины удаляемой части оболочек и тем самым достичь необходимой интенсивности волноводной связи между двумя волокнами, то второй

вариант притягателен своей высокой технологичностью и повторяемостью результатов [5].

Вместе с тем каждый из этих способов имеет свои недостатки. При изготовлении ответвителей методом полировки нет возможности *on line* контроля, и любые отклонения волноводных параметров (например, толщины удаляемой части оболочки) от заданных (рассчитанных) значений нельзя впоследствии подкорректировать. Таким образом, изготовление волоконных ответвителей методом полировки не очень технологично при массовом производстве. К тому же внешние возмущения, например, изменение окружающей температуры, могут вызвать значительные вариации характеристик такой конструкции. В свою очередь, при изготовлении волоконного ответвителя методом сплавления, из-за очень большого отношения диаметров оболочки и жилы, для достаточного сближения жил двух волокон необходимо многократно сужать их диаметры. Но в этих условиях режим распространения света сильно искажается и теряется стабильность волноводного распространения света. Следует отметить, что в двужильном волокне с контролируемым расстоянием между световедущими жилами эта задача сильно упрощается.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НАПРАВЛЕННОМ ОТВЕТВИТЕЛЕ

Ранее в литературе был предложен ряд подходов для аналитического описания коэффициента волноводной связи k_c между двумя модами HE_{11}, распространяющимися в двух идентичных, параллельных оптических волокнах со ступенчатыми профилями показателя преломления и различной степенью взаимного приближения [6, 7]. Для того чтобы вывести уравнение, которое в более общем виде описывает широкий диапазон конфигураций применяемых для этой цели волокон, мы предложили использовать более обобщенное выражение, полученное в работе [8], в которой изучены гибридные моды волокна и использованы функции Бесселя, а не их асимптотические формы. При небольших значениях числовой апертуры волокна, использованного для изготовления наших ответвителей, можно считать, что $\Delta n/n_1 = (n_1 - n_2)/n_1 = 1$, тогда выражение для волноводной связи можно упростить до:

$$k(d) = \frac{\lambda}{2\pi n_1}\frac{U^2}{r^2 V^2}\frac{K_0(W\,d/r)}{K_1^2(W)}, \qquad (1)$$

где λ – длина волны света в свободном пространстве, n_1 и n_2 – соответственно показатели преломления сердцевины и оболочки волокон, r – радиус сердцевины волокон, d – расстояние между световедущими жилами волокон, K_0 – модифицированная функция Бесселя, а K_1 – функция Бесселя второго рода. Параметры U и W являются параметрами волноводной моды и удовлетворяют условию $U^2 + W^2 = V^2$, где V – нормированная частота. Эти параметры определяются как

$$V = kr\sqrt{n_2^2 - n_2^2}, \quad U = r\sqrt{\left(k^2 n_2^2 - \beta^2\right)}, \quad W = r\sqrt{\left(\beta^2 - k^2 n_3^2\right)}, \qquad (2)$$

где n_2 – показатель преломления оболочки волокна, n_3 – показатель преломления воздуха, ($n_3 = 1$), $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

В реальном волоконном ответвителе геометрия волокон отличается от указанных выше условий, поскольку они изогнуты с радиусом кривизны R и параллельно смещены друг относительно друга. Из-за этого расстояние d между взаимодействующими волокнами и, следовательно, коэффициент волноводной связи $k(d)$, являются функцией положения z вдоль направления волокна. Второе последствие этого условия состоит в том, что кривизна каждого волокна искажает в них распределение полей мод и разрушает цилиндрическую симметрию, неявно предполагаемую в аналитическом выводе коэффициента волноводной связи. Радиусы кривизны волокон в рассматриваемом случае, как обычно, достаточно большие (25 см или более), и результирующее искажение моды в основном выражается в сдвиге моды в сторону внешней части изгиба волокна, его значение, рассчитанное по приближенной формуле, оказалось очень малым (менее 0.1 мкм). Таким образом, можно не учитывать второй эффект. Однако первый эффект довольно важен, так как радиус кривизны R управляет эффективной длиной взаимодействия устройства.

Зависимость коэффициента волноводной связи от положения z требует рассмотрения уравнений связанных волн, определяющих эволюцию перекачки мощности вдоль длины взаимодействия. Такая задача распределенной связи в [9] была решена с использованием аналогичных подходов. Прямым интегрированием перекачки мощности вдоль оси z можно легко показать, что решение новых уравнений связанных волн описывается следующим образом:

$$P_1 = P_0 \cos^2(k_{c0}L), \quad P_2 = P_0 \sin^2(k_{c0}L), \tag{3}$$

где

$$k_{c0}L = \int_{-\infty}^{+\infty} k_c(z)\,dz. \tag{4}$$

Здесь мы интеграл определяем как произведение k_cL, где $k_{c0} = k_c(0)$ – значение коэффициента связи в центре области связи ($z = 0$), где расстояние между волокнами минимально (рис. 1), а L – эффективная длина взаимодействия ответвителя. Такое определение исходит из предположения, что ответвитель можно полностью характеризовать коэффициентом волноводной связи и эффективной длиной взаимодействия.

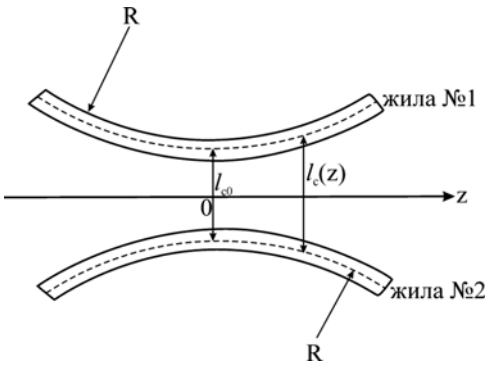


Рис. 1. Относительное положение волоконных сердцевин в области взаимодействия в направленном ответвителе.

При таком определении коэффициент волноводной связи ответвителя (при заданной длине волны) равен коэффициенту волноводной связи параллельных волокон с расстоянием между ними, равным расстоянию между изогнутым волоконным ответвителем в центре области связи (d_0). Эффективная длина взаимодействия L представляет собой длину эквивалентного параллельного волоконного ответвителя с расстоянием d_0, который дает такое же распределение мощности, что и изогнутый волоконный ответвитель.

В нашем случае расстояние $d(z)$ между сердцевинами является функцией радиуса кривизны волокна R и поперечной координаты y:

$$d = \sqrt{\left(d_0 + \frac{z^2}{R}\right)^2 + y^2}, \tag{5}$$

где параболическая аппроксимация используется с условием, что $z << R$. Для получения более простого выражения аналитической зависимости длины взаимодействия L ответвителя проведено упрощение геометрических параметров при использовании асимптотической формы модифицированной функции Бесселя второго типа, K_0 и K_1, которое с учетом формулы (1) можно представить как:

$$L \approx \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{\frac{d_0}{d}} \exp - v\left(\frac{d - d_0}{r}\right) dz. \tag{6}$$

Учитывая, что для описанных выше волокон $y = 0$ и $z^2 \ll d_0 R$, этот интеграл сводится к следующему:

$$L = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{Wz^2}{r_{co} R}\right) dz = \sqrt{\frac{\pi r_{co} R}{W}}. \tag{7}$$

Уравнение (7) показывает, что эффективная длина взаимодействия ответвителя с изогнутым волокном зависит от радиуса кривизны R, но не от расстояния между волокнами d_0, как это можно было ожидать.

При описании механизма перекачки мощности волоконный ответвитель рассматривается как композитный волновод. Поскольку радиус конический части волокна медленно изменяется вдоль оси распространения, можно предположить, что возбуждаются только первая (симметричная) и вторая (антисимметричная) моды композитного волновода. Профиль моды волоконного ответвителя можно описать как суперпозицию двух супермод композитного волновода. Так как две моды имеют разные постоянные распространения, оптическая мощность периодически перекачивается между двумя волокнами. Коэффициент волноводной связи k_c равен половине разности постоянных распространения двух мод

$$k_c = \frac{\beta_s - \beta_a}{2}, \tag{8}$$

где β_s и β_a – постоянные распространения симметричной и антисимметричной супермод волновода. Формула для коэффициента волноводной связи, полученная путем теоретического расчета постоянных распространения волокон, выражается как:

$$k_c = \frac{3\pi\lambda}{32 n_2 r^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + (1/V)\right)^2}, \tag{8}$$

где n_2 – показатель преломления оболочки волокна.

III. МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ответвители на основе двужильного волокна были изготовлены из волокна типа $(SiO_2+GeO_2)/SiO_2$ методом «стержня в трубке» [6]. В экспериментах с излучением в видимой области спектра применялось двужильное волокно с диаметром световедущих жил d_{c0} = 6 мкм, расстоянием между ними $l_{c0\text{-}c0}$ = 24 мкм и разностью показателей преломления световедущих жил и оболочки $\Delta n=2.3\times10^{-3}$, а в ближней ИК области соответственно волокно с d_{c0} = 8 мкм, $l_{c0\text{-}c0}$ = 28 мкм, и $\Delta n=2.62\times10^{-3}$. Ответвители изготовляли методом сплавления волокон в поле дугового электрического разряда небольшого (1–3 см) участка длинного (~2 м) отрезка двужильных волокон. Так как в изученных двужильных волокнах световедущие жилы расположены на значительном расстоянии друг от друга и нет взаимного перекрытия полей их мод, излучение накачки, введенное в одну из этих жил, может генерировать световой континуум только в нем. Но в конце волокна, в ответвителе, световой континуум претерпевает частичную перекачку в другую жилу, в зависимости от длины волны и волноводных характеристик ответвителя.

Для изготовления ответвителя небольшой его отрезок нагревали до температур смягчения кварцевого стекла и медленно вытягивали для образования биконической формы. Как обычно, диаметр поперечного сечения сплавленной области волокна уменьшали на несколько десятков процентов.

На рис. 2 показан общий вид установки, разработанной для изготовления сплавных волоконных интерферометров.

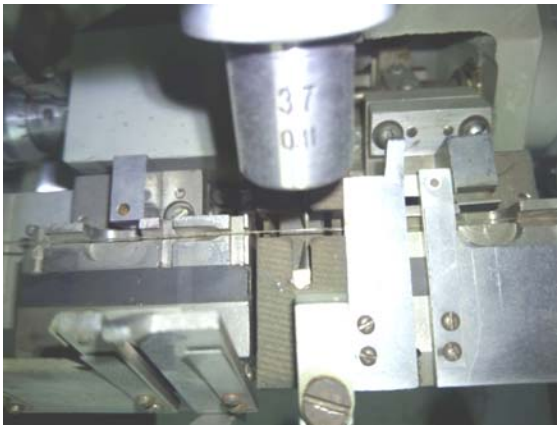


Рис. 2. Общий вид установки для изготовления сплавного волоконного интерферометра.

Установка для сплавления и сварки волокна включает в себя высокопрецизионные механические подвижки, микроскоп для визуального наблюдения области сплавления волокна, системы электронного контроля интенсивности света на выходе двух жил волокна, тока дуговой сварки и температуры сплавления волокна. В установке имеется возможность перемещения области волокна, где формируется ответвитель, относительно электродов разряда в трех пространственных направлениях с точностью не хуже 1–2 мкм, что обеспечивается высокоточными, безлюфтовыми направляющими, приводимыми в действие шаговым двигателем, а также пьезокерамическими дисками, толщину которых можно было плавно изменять подачей постоянного электрического

напряжения до 100 В. Процесс изготовления ответвителя завершался после достижения предварительно рассчитанных теоретических значений волноводных характеристик на трех длинах волн RGB-светодиода, 0.465, 0.525 и 0.640 мкм.

Для изготовления ответвителя небольшой (до 4 см) участок в конце двужильного волокна освобождался от полимерного (акрилового) защитного покрытия. После очищения спиртом этот участок волокна размещался на предметном столике указанного устройства сплавления с небольшим продольным натяжением для того, чтобы исключить свисание волокна из-за силы тяжести, которое может вызвать искажение волноводных параметров ответвителя.

Принцип работы установки сплавления волокон показан на рис. 3 в виде его блок-схемы. Линии (слева направо) условно показывают два отдельных волокна или две световедущие жилы двужильного волокна, из которых формируется ответвитель. Сближение жил в области сплавления осуществляли при смягчении и вытяжке волокна за счет сил поверхностного натяжения материала – кварцевого стекла. Разогрев области формирования ответвителя производили дуговым разрядом (7) с помощью вольфрамовых электродов диаметром 4 мм (сверху и снизу).

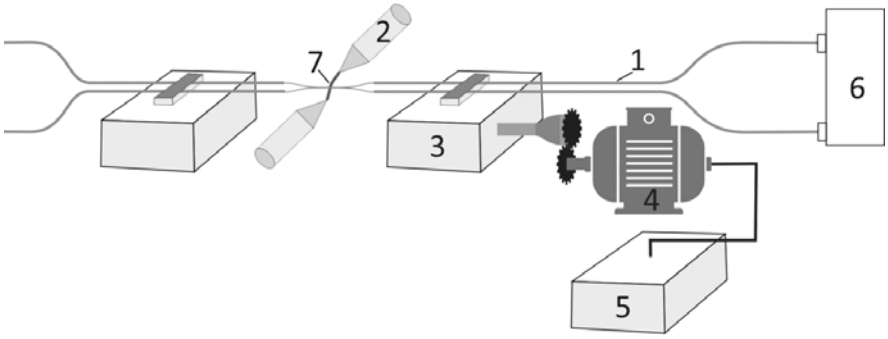


Рис. 3. Блок-схема установки для изготовления волоконного интерферометра сплавным методом. 1 – волокно, 2 – электрод, 3 – высокоточный направляющий, 4 – шаговый двигатель, 5 – блок управления, 6 – блок контроля, 7 – электрический разряд.

Участок волокна, где формировался ответвитель, нагревали до температур смягчения кварцевого стекла и медленно вытягивали по длине с тем, чтобы образовать однородный и плавно меняющийся конус. При этом на протяжении всего процесса контролировали интенсивность световых волн, выходящих из двух жил волокна, и температуру в области дуги.

Хотя температура плавления кварцевого стекла составляет 1800°C, оно начинает деформироваться уже при температуре около 1000°C [10]. Поэтому для достижения искомых значений волноводных параметров изготовляемых ответвителей необходимо было установить оптимальные температуры, при которых производится их вытяжка. При этом ключевым параметром контроля являются дополнительные оптические потери, вызванные образованием механических напряжений в материале из-за неоптимального плавления стекла. Чтобы избежать деформации раскалённого волокна под воздействием силы тяжести и появления избыточных потерь за счёт такой деформации, сначала была

определена зависимость вязкости материала волокна от температуры. Для этого использовали метод изгиба, который поясняется на рис. 4. Волокно длиной около 30 см, после удаления его защитного покрытия, размещали в держателе. Его конец выступал на 50±0.5 мм от края держателя. Был выбран диапазон температур нагрева 1050–1400°C, так как такой диапазон используется для изготовления волоконного ответвителя. Время выдержки составляло 2–10 мин.

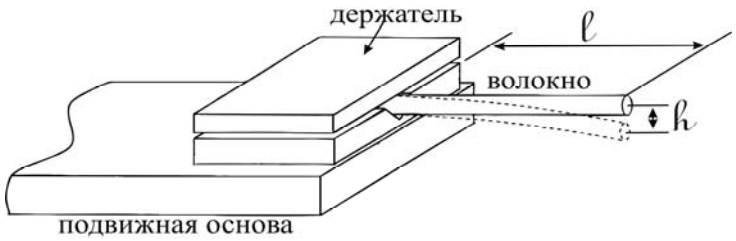


Рис. 4. Схематическое пояснение метода определения вязкости материала волокна с помощью изгиба.

Волокно изгибается во время нагрева, как показано на рис. 4. Отклонение (h) свободного конца волокна связано с вязкостью его материала. Вязкость рассчитывалась в соответствии с формулой, выведенной в работе [10]:

$$\eta = \frac{2}{3}\frac{\rho g l^4}{d^2}\frac{t}{h}. \qquad (9)$$

Здесь ρ = 2200 кг/м^3 – плотность кварцевого стекла, l = 50 мм – длина выступающего из держателя участка волокна, d = 125 мкм – внешний диаметр волокна, t = 2–10 мин – время пребывания волокна при высокой температуре, h – отклонение свободного конца закрепленного волокна. На рис. 5 показан характер изменения вязкости плавленого кварца от температуры.

В отличие от длины ответвления, степень плавления можно контролировать изменением температуры электрической дуги и скоростью удлинения волокна. Скорость удлинения, которая индуцирует деформацию в соединенных волокнах, можно регулировать с помощью шагового двигателя и комбинацией зубчатых переходов. В нашей установке был использован шаговый двигатель марки ШДР-711, который вместе с тремя зубчатыми переходами обеспечивал перемещение волокна на 350 мкм за один оборот. В целом, скорость вытягивания волокна можно было варьировать в диапазоне 50–400 мкм/с. Таким образом, для выявления условий минимизации дополнительных оптических потерь за счет деформации в материале волокна и необходимых температур участка сплавления волокна, обеспечивающих нужную конфигурацию сужения волокна, были измерены зависимости дополнительных потерь от скорости вытягивания волокна при различных температурах. Путем изменения температуры и положения волокна относительно поля дуги были эмпирически определены оптимальные температуры и скорости удлинения. На рис. 6 показаны такие зависимости – наиболее оптимальным для сплавления исследованных волокон оказалась температура 1350°C при скорости 150 мкм/с. А при более высоких или низких температурах, также как и скоростях вытяжки, резко увеличиваются дополнительные потери, связанные с напряжениями в материале.

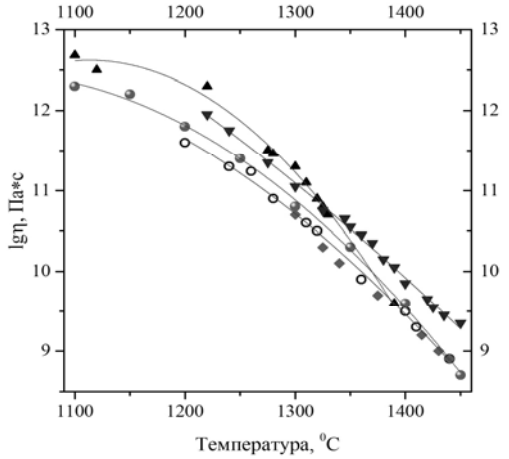


Рис. 5. Зависимость вязкости плавленого кварца от температуры. Открытые кружки – 5-ти см отрезок волокна №1 (d_{c0} = 6 мкм, Δn=2.3×10^{-3}), черные шарики – 10-ти см отрезок волокна №1 (d_{c0}=6 мкм, Δn=2.3×10^{-3}), прямой треугольник – 5-ти см отрезок волокна №2 (d_{c0}=8 мкм, Δn=2.62×10^{-3}), перевёрнутые треугольник – 5-ти см отрезок волокна №2 (d_{c0}=8 мкм, Δn=2.62×10^{-3}), ромбики – данные из литературы [10].

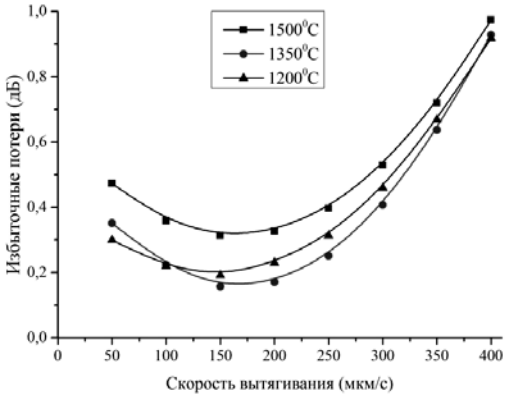


Рис. 6. Зависимости избыточных оптических потерь за счет напряжения в материале волокна от скорости вытяжки при различных температурах сплавления волокна.

Таким образом, изучение процесса формирования направленного ответвителя из двужильного волокна показывает, что ключевыми факторами, определяющими его волноводные характеристики, являются длина ответвления, расстояние между сердцевинами, скорость вытягивания и температура размягчения волокна. Точно контролируя параметры конфигурации ответвителя, можно его изготовлять с заданными значениями коэффициента перекачки на различных длинах волн и с достаточно низким уровнем избыточных оптических потерь, не более 2 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Keiser. Optical Fiber Communications (New York, McGraw-Hill, 2008).
2. J. Teng, et al., Optical Fiber Technology **20**, № 3, 239-244 (2014).
3. А.Г. Булушев, Е. М. Дианов, А. В. Кузнецов, О.Г. Охотников, В.М. Парамонов, В.А. Царев, Квантовая электроника **17**, № 5, 621-626 (1990).
4. А.Г. Булушев, Е. М. Дианов, О.Г. Охотников, Квантовая электроника **15**, № 7, 1433-1441 (1988).
5. B. Pal, Fiber and Integrated Optics **22**, № 2, 97-117 (2003).
6. K. Schuster, et al., Advanced Optical Technologies **3**, № 4, 447-468 (2014).
7. Y. Liu, et al., International Society for Optics and Photonics **6353**, 12 (2006).
8. E.A. Zakhidov, M.A. Kasymdjanov, S.S. Kurbanov, P.K. Khabibullaev. In: Proceedings of NATO RTA Agency Conference “Complementary of Ladars and Radars” (Prague, 2002, 158-166).
9. E.A. Zakhidov, A.M. Kokhkharov, F.V. Mirtagjiev, Sh.Q. Nematov, I.I. Tadjibaev, O.V. Trunilina, Turkish Journal of Physics **38**, № 1, 64-72 (2014).
10. S. Sakaguchi, S. Todoroki, Journal of Non-Crystalline Solids **244**, № 2-3, 232-237 (1999).