

Ф И З И К А

УДК 681.7.02

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ И 3D ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В СТЕКЛЕ

Векшин М. М., Никитин В. А., Яковенко Н. А.

SYNTHESIS OF OPTICAL WAVEGUIDE WITH COMPLICATED CROSS-SECTION SHAPE AND 3D WAVEGUIDE STRUCTURES IN GLASS

Vekshin M. M., Nikitin V. A., Yakovenko N. A.

Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia
e-mail: vek-shin@mail.ru

Abstract. Physics and mathematical modeling of multi-step processes of waveguide structures fabrication in glass K-8 with complex form of it cross-section, based on the combined, solution of two-dimensional nonlinear diffusion equation, electrostatic equation and wave equation has been made.

The equations were solved by finite-difference method. With the help of calculated values of silver ion concentration in glass the refractive index profile (proportional to concentration) was determined and, as a next step, optical characteristics of waveguide was calculated by analysis of it mode structure.

Model of partially buried waveguide has been made, which has asymmetric refractive index profile. The experimental sample of such waveguide has been made. The model describes the fabrication of waveguide channel in K-8 type glass, where the burial process is performed with the taper-shape mask covering the part of waveguide surface, which leads to different value of burial depth along waveguide longitudinal axis. It was shown that lateral shift of waveguide concentration profile, caused by direction and density of electrostatic flux at angle between waveguide axis and mask edge, having the value less than 1,5 degree, doesn't affect the optical energy loss in the waveguide.

Also the modeling of technological processes of single-mode optical waveguides fabrication in two vertically placed toward each other layer in order to build 3D integrated-optic circuit. The simulation was made in order to select technological parameters with similar values, with the working wavelength 1.55 micrometer. The results of calculation showed that according to this purpose the concentration of melt for the second ion exchange must be half of it value for the first one; the gap width in mask for the first step – 2 micrometer, for the second exchange – 5 micrometer.

Keywords: integrated optics, ion exchange in glass, 3D waveguide optical circuits.

Введение

Создание интегрально-оптических схем — аналогов электронных микросхем, в которых передача информации и функции ее обработки осуществляются на оптическом уровне, имеет большие перспективы развития, обусловленными свойствами световой волны. Элементы интегральной оптики уже используются в современных средствах оп-

тических инфокоммуникаций, при создании высокочувствительных сенсоров различных физических величин и химико-биологических компонентов. Также развитие исследований в области квантовых вычислений требует разработки новой элементной базы для систем оптической квантовой обработки информации, использующих интегрально-оптические монолитные схемы [1, 2].

Векшин Михаил Михайлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: vek-shin@mail.ru

Никитин Валерий Александрович, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: nikitin@phys.kubsu.ru

Яковенко Николай Андреевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: dean@phys.kubsu.ru

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-48-230392 р_а.

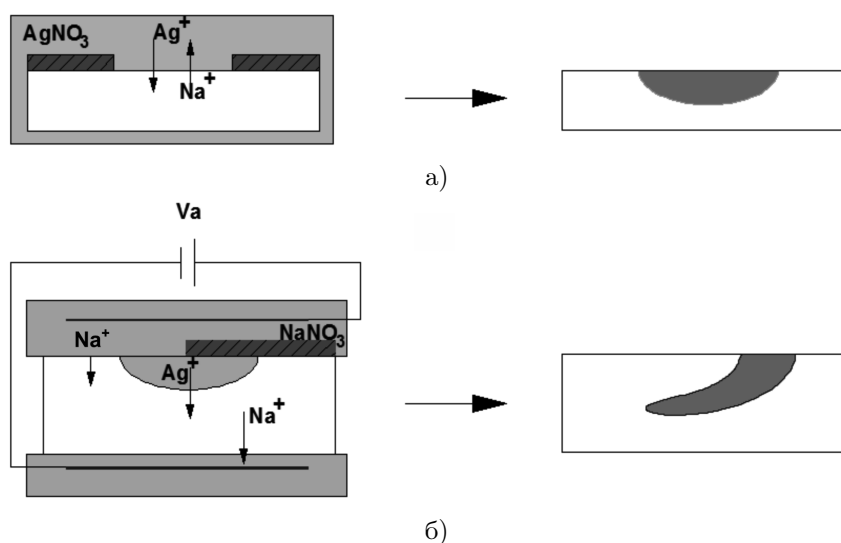


Рис. 1. Основные этапы технологии формирования селективно-заглубленных волноводов в стекле методом ионного обмена: (а) — термический ионный обмен, (б) — электростимулированное заглубление части волновода

Построение интегрально-оптических схем для оптической обработки информации предполагает запланированный синтез определенного профиля показателя преломления волноводной структуры. Управление формой профиля позволяет конструировать оптические интегральные схемы различного назначения. В частности, в настоящее время актуальным является разработка 3D волноводных оптических схем многофункционального назначения, в том числе для схем интегральной квантовой фотоники. Другой важной задачей является построение поляризационных волноводных элементов и схем для применения в современных системах волоконно-оптической связи с поляризационным кодированием [2].

Целью настоящей работы является физико-математическое моделирование технологических процессов формирования волноводных структур сложной формы в стекле К-8: волновода с асимметричной формой поперечного сечения и волноводной структуры в двух слоях, смещенных друг относительно друга в вертикальном направлении.

Для названных целей используется технология многоэтапного ионного обмена и электростимулированного внедрения ионов [3–5]. Данная технология имеет несколько явных преимуществ перед другими технологиями. Показатель собственного поглощения стекол является очень низким в ближней ИК-области спектра, волноводы в стеклах обла-

дают низкими потерями — до 0,1 дБ/см и менее, причем потери не зависят от поляризации световой волны. Соединение волноводов, сформированных в стеклах, с оптическими волокнами имеет очень малые потери из-за схождения показателей преломления. Технология производства волноводных схем в стекле является относительно недорогой.

Формирование волноводных структур в стекле состоит из последовательности этапов: термического ионного обмена (либо электростимулированного внедрения ионов); заглубления волновода путем стимулированной миграции ионов; и, дополнительно, термического отжига волновода [4, 5]. Процесс формирования волновода, как правило, производится путем ионного обмена $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ в стекле, помещенном в расплав смеси солей $\text{AgNO}_3:\text{NaNO}_3$. Заглубление волноводного канала производится путем приложения внешнего напряжения к подложке, помещенной в расплав соли NaNO_3 .

1. Формирование волноводов сложной формы поперечного сечения и 3D волноводных схем

Рассмотрим процесс формирования волноводного оптического канала с асимметричной формой поперечного сечения, который может быть использован как для построения преобразователей поляризации, так и для организации передачи оптической энергии от

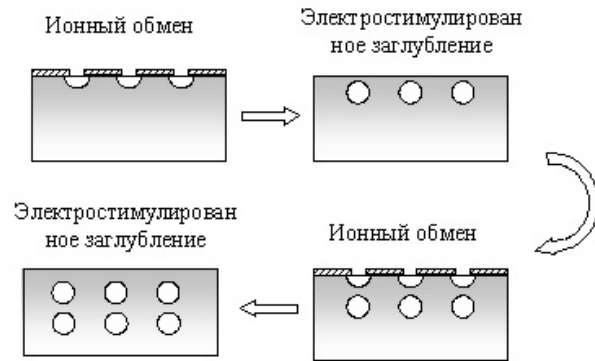


Рис. 2. Схема технологии формирования двухслойных интегрально-оптических схем

заглабленного волновода к волноводу, расположенному в приповерхностном слое стекла [6–8].

Изготовление асимметричного волноводного оптического канала производится в два этапа, которые показаны на рис. 1. На первом этапе формирования волновода стеклянная подложка помещается в расплав соли AgNO_3 и происходит внедрение ионов Ag^+ за счет термического ионного обмена $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ в стекло через щель в алюминиевой маске, которая специально наносится на поверхность подложки. На втором этапе производится селективное заглабление канала путем приложения внешнего электрического поля к подложке, помещаемой в расплав соли NaNO_3 . На этом этапе нанесенная на стекло алюминиевая маска закрывает часть поверхности над сформированным на первом этапе волноводным каналом.

Далее рассмотрим более сложную технологическую схему формирования интегрально-оптических волноводов в двух плоских слоях, смещенных друг относительно друга в вертикальном направлении [9]. Схема четырехэтапного процесса формирования волноводов в два плоских слоя представлена на рис. 2. Формирование волноводов проводится в четыре этапа. Технология предполагает последовательное выполнение операций термического ионного обмена $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$, электростимулированного заглабления ионов Ag^+ в стекле, повторного ионного обмена $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ и повторного заглабления при специально подобранных технологических режимах

Физико-математическое моделирование ионообменного технологического процесса основано на решении нелинейного уравнения

диффузии следующего вида [5]:

$$\frac{\partial C_{Ag}}{\partial t} = \nabla \left(\frac{D_{Ag}}{1 - (1 - M) C_{Ag}} \nabla C_{Ag} \right) - \frac{D_{Ag}}{1 - (1 - M) C_{Ag}} \frac{q \mathbf{E}_{ext}}{f k T} \nabla C_{Ag}, \quad (1.1)$$

где $C_{Ag} = C_{Ag}(x, y)$ — распределение относительной концентрации внедряемого иона серебра в поперечном сечении волновода, $C_{Ag} = c_{Ag}/c_0$, c_{Ag} — концентрация ионов серебра, c_0 — начальная концентрация ионов натрия в стекле; D_{Ag} — собственный коэффициент диффузии ионов серебра, M — отношение собственных коэффициентов диффузии ионов серебра и натрия, $M = D_{Ag}/D_{Na}$; q , f , k , T — заряд электрона, коэффициент корреляции, постоянная Больцмана и температура по Кельвину соответственно, t — время диффузионного процесса; $\mathbf{E}_{ext}(x, y)$ — напряженность стимулирующего электрического поля в стеклянной подложке. Решение уравнения (1.1), описывающее пространственное распределение концентрации внедренных ионов серебра, определяет профиль показателя преломления $n(x, y)$ формируемого волновода, так как показатель преломления прямо пропорционален концентрации этих ионов

$$n(x, y) = n_s + \Delta n C_{Ag}(x, y),$$

где n_s — показатель преломления стеклянной подложки, Δn — максимальное приращение показателя преломления волновода.

Для учета влияния стимулирующего электрического поля, прикладываемого для заглабления волновода, уравнение диффузии необходимо решать совместно с уравнением

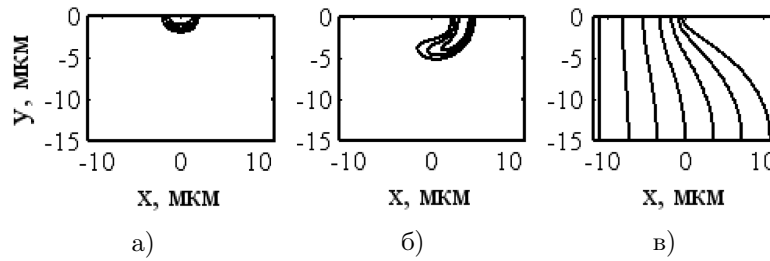


Рис. 3. Контуры двумерного распределения показателя преломления в поперечном сечении волновода после этапов термического ионного обмена и после этапа селективного заглабления — (а) и (б), соответственно; (в) — силовые линии электростатического поля этапа заглабления волновода

электростатики, в котором учитывается неоднородность ионной проводимости стекла в области внедрения ионов серебра

$$\sigma \nabla^2 \varphi + (\nabla \sigma, \nabla \varphi) = 0, \quad (1.2)$$

где φ — потенциал статического поля, общая ионная проводимость σ рассчитывается следующим образом:

$$\sigma = \frac{D_{Ag} c_0 q^2}{fkT} \left[\frac{1}{M} (1 - C_{Ag}) + C_{Ag} \right]. \quad (1.3)$$

Задача определения внешнего электрического поля $\mathbf{E}_{ext}(x, y)$ сводится к решению уравнения (1.2), в котором проводимость определяется выражением (1.3). По данному уравнению определяется распределение напряженности электростатического поля в стекле как градиент потенциала ($\mathbf{E}_{ext} = -\text{grad}(\varphi)$), при наличии маски определенной формы на ее поверхности или при ее отсутствии.

Значение величины M для ионного обмена $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ зависит от состава стекла. Для обычного силикатного стекла она меньше, чем единица, а иногда значительно меньше единицы. Реконструкция параметров ионного обмена $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ в стекле типа К-8, проведенная авторами, приводит к значению параметра $M = 0,02 \div 0,03$, что сходится с аналогичным значением $M = 0,01$ у стекла типа ВК-7, его зарубежного аналога.

Для совместного решения нелинейного уравнения диффузии (1.1) и уравнения электростатики (1.2) в двумерном пространстве с соответствующими граничными и начальными (для уравнения (1.1)) условиями с целью расчета концентрационного профиля микроструктур был использован метод конечных разностей. Для решения уравнения диффузии использована неявная схема Крэнка–Николсона. Линеаризация уравнения и его

трансформация в разностное уравнение с постоянными коэффициентами произведена за счет специальных подстановок.

По расчетным значениям концентрации ионов серебра в стекле находится профиль показателя преломления волновода, далее оптические характеристики волновода определяются путем его модового анализа. Расчет мод волновода проводился путем решения векторного волнового уравнения. Решение также проводилось методом конечных разностей [10].

2. Результаты расчетов и эксперимента

Результаты физико-математического моделирования формирования асимметричного волноводного канала представлены на рис. 3. Показаны контуры двумерного распределения показателя преломления волноводного канала после этапа термического ионного обмена и после этапа селективного заглабления, а также силовые линии электростатического поля этапа заглабления волновода с маской, закрывающей правую половину поверхности подложки над волноводом. Технологические параметры процесса изготовления были подобраны для того, чтобы селективно-заглабленный волновод был одномодовым на длине волны 1,55 мкм.

Как видно из рис. 3б, в результате селективного заглабления волновода формируется волновод, имеющий форму «банана». При этом, как показали расчеты, частичное заглабление волновода сопровождается боковым смещением профиля концентрации волновода. Физическая причина этого факта связана с направлением и плотностью силовых линий электростатического поля вблизи края маски. В этой области, как это видно из рис. 3в, линии поля направлены под углом



Рис. 4. Фотография торца селективно-заглубленного волновода в стекле К-8

к вертикальной оси y , а не вдоль нее, и их плотность выше. Это означает, что напряженность электрического поля в этой области выше, чем вдали от края.

Также была построена модель формирования волноводного канала в стекле К-8, в котором процесс заглубления выполняется с маской, клинообразно покрывающей поверхность волновода, что приводит к различному уровню заглубления вдоль его продольной оси. Установлено, что боковое смещение профиля концентрации волновода, обусловленное направлением и плотностью силовых линий электростатического поля вблизи края маски при угле, образуемым осью волновода и краем маски, менее $1,5^\circ$, не влияет на оптические потери моды волновода.

Проведены предварительные эксперименты по созданию волновода по описанной выше технологии. На первом этапе в подложке стекла К-8 методом термического ионного обмена $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ из расплава смеси солей AgNO_3 и NaNO_3 , при температуре расплава 380°C , был сформирован каналный волновод через маску с шириной щели 3 мкм. На втором этапе он был селективно заглублен в расплаве соли NaNO_3 с использованием маскирующего алюминиевого слоя, частично закрывающего поверхность над волноводом. Заглубление проводилось в расплаве соли NaNO_3 при температуре 380°C в течение 7 мин. при стимулирующем напряжении 90 В.

На рис. 4 показана фотография торца волновода, сделанная с помощью микроскопа,

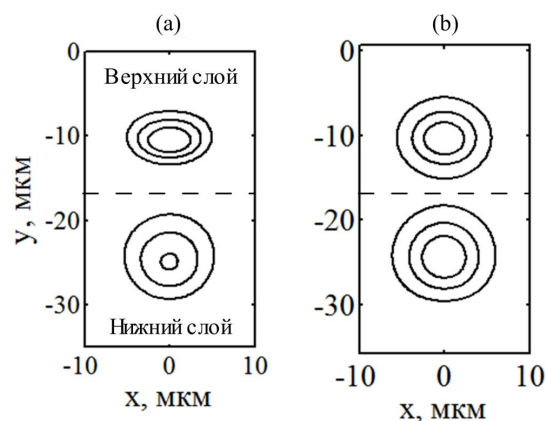


Рис. 5. Двумерное распределение показателя преломления поперечного сечения заглубленных в 2 слоя волноводов — (а) и распределение напряженности электрического поля мод волноводов — (б)

при вводе излучения белого света в этот волновод с противоположного торца.

Как видно, изготовленный волновод имеет такую же асимметричную изогнутую форму, как и на рис. 2б, данные для которого были получены путем физико-математического моделирования процесса его изготовления. О результатах систематических измерений оптических характеристик таких волноводов будет сообщено дополнительно.

Далее была построена модель формирования волноводных каналов в стекле в 2 слоя, расположенных один под другим. Расчеты проводились с целью подбора технологических параметров формирования одномодовых волноводов с близкими оптико-волноводными параметрами на рабочей длине волны 1,55 мкм. Результаты расчетов двумерного профиля показателя преломления волноводов и их модовых полей показаны на рис. 5.

Результаты расчетов показали, что для создания волноводов в два плоских слоя концентрация расплава для второго ионного обмена должна быть в два раза ниже, чем для первого; ширина щели в маске для первого этапа — 2 мкм, для третьего этапа — 5 мкм. Эффективные размеры электрического поля моды нижнего волновода по горизонтальной и вертикальной координате — 10,4 мкм и 9,6 мкм, соответственно. Он заглублен на 24,1 мкм относительно поверхности подложки. Для верхнего волновода соответствующие размеры поля моды имеют значения $9,5 \times 8,2$ мкм и он

заглублен на 10,1 мкм вглубь стекла. Расстояние между волноводами — 14 мкм. Волноводы с таким размером поля моды эффективно стыкуются со стандартными одномодовыми волоконными световодами, имеющими диаметр поля моды 10,2 мкм на длине волны 1,55 мкм, а расстояние между ними является достаточно большим для подавления эффекта направленной связи.

Заключение

Проведенное физико-математическое моделирование многоэтапных процессов формирования волноводных структур в стекле на основе совместного решения двумерного уравнения диффузии, уравнения электростатики и волнового уравнения подтвердило технологическую возможность формирования интегрально-оптических волноводов с асимметричной формой поперечного сечения, а также волноводных структур в два вертикально расположенных друг относительно друга слоя в стекле К-8. Такие волноводы предназначены для использования в составе поляризационных волноводных схем и 3D интегрально-оптических схем в современных системах волоконно-оптической связи, для сенсорных оптических систем и оптических схем квантовых вычислений.

Литература

1. Bogdanov S., Shalaginov M.Y., Boltasseva A., Shalaev V. M. Material platforms for integrated quantum photonics // *Opt. Mater. Express*. 2017. No. 2. P. 111–132. DOI: 10.1364/OME.7.000111
2. Векшин М.М., Кулиш О.А., Яковенко Н.А. Поляризационные элементы и устройства интегральной оптики. Краснодар: КубГУ, 2017. 240 с.
3. Иванов В.Н., Никитин В.А., Никитина Е.П., Яковенко Н.А. Получение полосковых волноводов с прогнозируемой формой сечения методом электростимулированной диффузии // *ЖТФ*. 1983. № 10. С. 2088–2090.
4. Никитин В.А., Яковенко Н.А. Электростимулированная миграция ионов в интегральной оптике. Краснодар: КубГУ, 2013. 245 с.
5. Tervonen A., West B.R., Honkanen S. Ion-exchanged glass waveguide technology: a review // *Optical Engineering*. 2011. №7. Paper 071107. DOI: 10.1117/1.3559213
6. Rehouma F., Persegol D., Kevorkian A. Optical waveguides for evanescent wave sensing // *Applied Physics Letters*. 1994. Vol.65. P. 1477–1479. DOI: 10.1063/1.113005

7. West B.R., Madasamy P., Peyghambarian N., Honkanen S. Modeling of ion-exchanged waveguide structures // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2004. Vol. 347. P. 18–26. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2004.09.013
8. Jordana E., Ghibaudoa E., Boucharda A. Design of a waveguide with optics axes tilted by 45° and realized by ion-exchange on glass // *Proc. of SPIE*. 2016. Vol. 9750. Paper 975009. DOI:10.1117/12.2209260
9. Zheng B., Hao Y.-L., Li Y.-B., Yang J.-Yi, Jiang X.-Q., Zhou Q., Wang M.-H. Manufacturing and characterization of buried optical waveguide stack in glass substrate // *Journal of Inorganic Materials*. 2012. No. 9. P. 906–910. DOI: 10.3724/SP.J.1077.2012.11687
10. Lüsse P., Stuwe P., Schüle J., Unger H.G. Analysis of vectorial mode fields in optical waveguides by a new finite difference method // *J. Lightwave Technology*. 1994. No. 3. P. 487–494. DOI: 10.1109/50.285331

References

1. Bogdanov S., Shalaginov M.Y., Boltasseva A., Shalaev V. M. Material platforms for integrated quantum photonics. *Opt. Mater. Express*, 2017, no. 2, pp. 111–132. DOI: 10.1364/OME.7.000111
2. Vekshin M.M., Culish O.A., Yakovenko N.A. *Polarizatsionnye elementy i ustroystva integralnoi optiki* [Integrated-optic polarization elements and devices]. Krasnodar, KubSU, 2017, 240 p.
3. Ivanov V.N., Nikitin V.A., Nikitina E.P., Yakovenko N.A. Poluchenie poloskovykh volnovodov s progniziruemoj formoj secheniya metodom ehlektrostimulirovannoj diffuzii [Fabrication of strip waveguides with planned form of cross-section by field-assisted diffusion method]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 1983, no. 10, pp. 2088–2090.
4. Nikitin V.A., Yakovenko N.A. *Elektrostimulirovannaya migratsia ionov v integralnoi optike* [Electric field-assisted ion migration in integrated optics]. Krasnodar: KubSU, 2013, 245 p.
5. Tervonen A., West B.R., Honkanen S. Ion-exchanged glass waveguide technology: a review. *Optical Engineering*, 2011, no. 7, Paper 071107. DOI: 10.1117/1.3559213.
6. Rehouma F., Persegol D., Kevorkian A. Optical waveguides for evanescent wave sensing. *Applied Physics Letters*, 1994, vol. 65, pp. 1477–1479. DOI: 10.1063/1.113005
7. West B.R., Madasamy P., Peyghambarian N., Honkanen S. Modeling of ion-exchanged waveguide structures. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2004. vol. 347, pp. 18–26. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2004.09.013
8. Jordana E., Ghibaudoa E., Boucharda A. Design of a waveguide with optics axes tilted

- by 45° and realized by ion-exchange on glass. *Proc. of SPIE*, 2016, vol. 9750, Paper 975009. DOI:10.1117/12.2209260
9. Zheng B., Hao Y.-L., Li Y.-B., Yang J.-Yi, Jiang X.-Q., Zhou Q., Wang M.-H. Manufacturing and characterization of buried optical waveguide stack in glass substrate. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, no. 9, pp.906–910. DOI: 10.3724/SP.J.1077.2012.11687
10. Lüsse P., Stuwe P., Schüle J., Unger H.G. Analysis of vectorial mode fields in optical waveguides by a new finite difference method. *J. Light-wave Technology*, 1994, no. 3. pp. 487–494. DOI: 10.1109/50.285331

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2017

© Векшин М. М., Никитин В. А., Яковенко Н. А., 2017

Статья поступила 17 июля 2017 г.