

О НЕКОТОРЫХ ИОННО-ЛУЧЕВЫХ МЕТОДАХ ПОЛУЧЕНИЯ И МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ

Л.С. Марценюк

Институт ядерных исследований НАН Украины

пр. Науки, 47, Киев, 03068, Украина, тел. (380-44)525-51-01, 525-46-92, prolisok77@yandex.ru

Проведен анализ некоторых методов создания оптических волноводов с использованием ядерных технологий: введения в полупроводниковые и нелинейно-оптические материалы дефектов за счет облучения ионами и последующего отжига, ядерного легирования. С позиции проведенного анализа предложены методы создания оптических волноводов в перспективном для оптоэлектроники материале – дифосфиде цинка (ZnP_2) и указаны способы целенаправленного изменения параметров таких изделий.

Введение

Интегральная оптика возникла в связи с необходимостью создания устройств, которые, используя все преимущества в передаче сигналов волоконно-оптическими системами, позволили бы проводить целенаправленные манипуляции излучением, поступающим из оптического волокна на вход интегрально-оптической схемы. Как следует из [1], центральным элементом интегральной оптики является волновод (полосковый, планарный или заглубленный), образуемый в оптически прозрачных средах (рис.1).

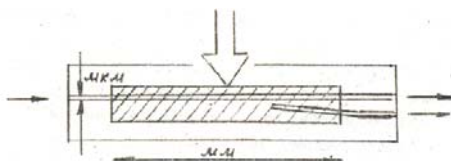


Рис. 1. Схема операций, осуществляемая интегрально-оптическим устройством в электрооптических и магнитооптических кристаллах.

Поэтому главной технологической задачей и является формирование таких волноводов. Для того, чтобы свет мог распространяться по волноводу, необходимо, чтобы показатель преломления в нем был меньше, чем в основном материале.

К наиболее перспективным для задач интегральной оптики относятся электрооптические и магнитооптические кристаллические диэлектрики, центральным из которых является ниобат лития, кварцевые и другие стекла, полупроводниковые соединения типа A_3B_5 и A_2B_6 .

Основная часть

Для создания интегрально-оптических элементов выбор удачной технологии является решающим. Поэтому необходимо в общих чертах рассмотреть процессы, приводящие к изменению показателя преломления в различных материалах при ионной имплантации.

Идея создания волноводов ионно-лучевыми методами основывалась на возможности целенаправленного изменения структуры участков оптического материала путем облучения его различными частицами, что приводит к изменению

плотности, а, следовательно, и показателя преломления.

Минимальное изменение показателя преломления, необходимое для осуществления волновода [2], определяется из формулы:

$$\Delta n_{\min} \geq \frac{1}{32n} \left(\frac{1}{d} \right)^2,$$

где λ - длина волны излучения, d - толщина волновода.

Такое изменение Δn можно проводить любыми частицами, но для создания качественных волноводов с малым ослаблением световой волны необходимо учитывать происходящие при этом процессы. Наиболее удобными для создания локализованных участков оказались положительно заряженные частицы: протоны, дейтроны и ионы; очень часто используются ионы He^+ , электроны. Положительные частицы и ионы используются как для проведения структурных изменений, так, в некоторых случаях, для внедрения легирующих добавок и осуществления других химических изменений, в том числе, ядерного легирования.

Изменение показателя преломления можно оценить по формуле Лоренц-Лоренца [3]:

$$\left(\frac{\Delta n}{n} \right) = \left(\frac{(n^2 - 1)(n^2 + 2)}{6n^2} \right) \left(\frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + F \right),$$

где V - объем, α - поляризуемость, F - величина, рассчитываемая из структурных изменений в материале.

Таким образом, вклад в величину Δn вносят изменения плотности и поляризуемости вещества. Для диэлектриков существенным является изменение плотности, а для полупроводников – обе составляющие.

Как известно, энергетические потери ионов в веществе происходят как за счет взаимодействия с электронами, так и в результате ядерных столкновений. При этом если частицы достаточно быстрые, происходит ионизация электронов, при меньших энергиях – смещение атомов. Поэтому обычно наблюдаются две характерные области на кривой распределения показателя преломления: область электронных взаимодействий и об-

ласть ядерных столкновений. При удачном выборе типа иона первая область, как правило, восстанавливается в результате последующего за имплантацией отжига.

Волноводные участки формируются, в основном, в области конца треков заряженных ионов. В полупроводниковых соединениях на величину показателя преломления влияет концентрация свободных носителей. Возникающие при облучении различные дефекты являются центрами захвата этих носителей, образуя, обычно, глубокие уровни в запрещенной зоне. В результате происходит уменьшение концентрации свободных носителей и увеличение показателя преломления.

Величина изменения Δn при изменении концентрации свободных носителей определяется из формулы [4]:

$$\Delta n = \frac{e^2}{2\pi\epsilon_0 m^* \omega^2} (N_s - N_c)$$

где e - заряд электрона; N_s и N_c - концентрация свободных носителей в материале и облученном слое; m^* - эффективная масса заряда; ω - круговая частота света с длиной волны λ , ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума.

В полупроводниках оптические волноводы в ряде случаев формируются облучением частицами с низкими энергиями (порядка нескольких кэВ) за счет воздействия, в основном, на поверхностный слой. Энергии более 100 кэВ применяют для генерации дефектов, вызывающих изменение плотности свободных носителей.

Создание волноводных структур в полупроводниковых материалах является важной задачей в связи с перспективой создания в единичном кристалле всего комплекса необходимых для функционирования интегрально-оптических схем преобразований типа: генерация, модуляция, детектирование и т.д., что практически невозможно осуществить в других материалах. Наиболее широко используемыми, в силу уникальности характеристик и доступности, являются GaP и $GaAs$, а также гетероструктуры типа $GaAlP$, $GaAlAs$ на их основе. Используются также и другие соединения $A_3B_5 - A_2B_6$, что позволяет изготавливать различные изделия, в том числе и лазеры.

Учитывая высокие нелинейно-оптические характеристики и высокую фоточувствительность следует отнести к перспективным для оптоэлектроники материалам широкозонное полупроводниковое соединение - дифосфид цинка (ZnP_2) α - модификации.

Как показано в [4] для реализации волновода за счет создания участка с пониженной концентрацией свободных носителей необходимо, чтобы:

$$\Delta N = N_s - N_c \geq \frac{\pi^2 c_0 m^* \epsilon_0}{4e^2 d^2},$$

где c_0 - скорость света в вакууме.

Если учитывать только изменения ΔN [5], то минимальная концентрация N_s должна быть $6 \cdot 10^{17}$ и $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для кристаллов $GaAs$ и GaP . Так в [5] при облучении протонами с энергией 300 кэВ и при дозах до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ монокристаллов $GaAs$ были сформированы волноводы с глубиной залегания 3 мкм и N_s для необлученных образцов составила $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Учитывая такие данные, была предпринята попытка создания волновода в монокристалле дифосфида цинка. Как известно, [6], эти кристаллы являются непрямоугольными с шириной запрещенной зоны 2.05 эВ. Нелегированные кристаллы имеют p - тип проводимости и изменить тип проводимости можно введением добавок In или Ga в процессе выращивания [7]. Облучение протонами с энергиями 500 кэВ - 1 МэВ при дозах до 10^{16} см^{-2} специально нелегированных и легированных Ge монокристаллов ZnP_2 позволило получить слои неоднородности с глубиной до 7 - 10 мкм, которые, вероятно, могут, при дальнейшей обработке, проявить себя как сформированные в кристалле полосковые волноводы. Поверхности облученных монокристаллов стравливались в составе кислот: $HNO_3 : HCl = 1:1$ для определения глубины проникновения протонов и изучения свойств облученных кристаллов.

Как указано в [7], введение в процессе выращивания примесей In или Ga позволяло получать монокристаллы ZnP_2 n - типа проводимости, сопротивление которых уменьшалось на девять-десять порядков по сравнению с нелегированными кристаллами и наиболее высокоомными кристаллами ZnP_2 , легированными Ge ; на столько же возрастала концентрация носителей. По цвету, кристаллы n - типа были черными (в отличие от нелегированных монокристаллов, которые имеют ярко-красный цвет), а цвет кристаллов, легированных Ge , был темным и зависел от количества вводимой примеси. Исследования электрофизических характеристик [7] показали, что при введении In и Ga проявляются близкие донорные уровни в запрещенной зоне с энергией $E_v + 0,22 \text{ эВ}$ и $E_v + 0,50 \text{ эВ}$, возникновение которых и приводит к изменению типа проводимости.

При облучении ZnP_2 обнаруживалось поглощение в облученном слое монокристаллов, обусловленное, по-видимому, появлением глубоких компенсационных уровней. Механизм возникновения таких уровней исследовался в [8], где изучались облученные протонами и другими частицами монокристаллы ZnP_2 и обнаружено, что облучение протонами ведет к изменению в них концентрации глубоких безизлучательных центров.

Для некоторых образцов (нелегированных и легированных *Ge*) обнаруживалась более темная полоска на глубине около 10 мкм от поверхности кристалла. Возможно, за ее формирование ответственны дефекты, вносимыми протонами в области конца их треков, и она соответствует участку с измененным показателем преломления, который и требуется для создания волновода или удержания электромагнитного излучения в приповерхностной области (в зависимости от знака изменения показателя преломления). Для окончательного выяснения природы возникновения слоев неоднородностей при облучении кристаллов протонами и возможности формирования волноводных систем за счет создания таких слоев необходимы дальнейшие исследования.

Заключение

Проанализированы технологические особенности создания оптических волноводов при использовании различных ионно-лучевых технологий в перспективных для оптоэлектроники материалах. Указано, что одним из таких материалов может быть дифосфид цинка α — модификации. Сделана попытка сформировать полосковый

волновод за счет облучения потоком протонов монокристаллов этого соединения как специально нелегированных, так и с примесями *Ge*, введенными в процессе выращивания. Для окончательного выяснения вопроса о пригодности такого метода создания волновода необходимы дальнейшие исследования.

Список литературы

1. Волноводная оптоэлектроника. Пер. с англ. под ред. Тамира Т. - М.: Мир, 1991. - 574 с.
2. Namba S., Aritome H., Nishimura T. *et al.* // J. Vac.Sci and technol. - 1973. - Vol.10, №6, p.936-940.
3. Townsend P.D. // Nucl Instrum. And Meth. - 1990. - B46. - P.18-25.
4. Редько В.П., Штейнгарт Л.М. // Зарубежная радиоэлектроника -1977.- №1.С. 81-98.
5. Garmire H., Stoll H., Garin A., Hansperger R.G. // Appl.Phys. Lett. - 1972. Vol. 21, №3. - P. 83-88.
6. Рудь В.Ю., Рудь В.Ю., Вайполин И.В. и др. // Физика и техника полупроводников, 2009, том 43, вып. 7. С. 890-896.
7. Januškevičius Z., Marcenik L., Sakalas A., Sodeika A. // Phys.Stat.Sol.(a).-1980.- 59.- К 139-141.
8. Кудін А.П., Тартачник В.П., Литовченко П.Г. та ін. // Укр. фіз. журн. - 2002. - Т. 47. - 1. - С. 85-89.

ABOUT SOME ION-BEAM METHODS OF CREATION AND MODIFICATIONS OF INTEGRAL OPTICS ELEMENTS PROPERTIES

L.S. Martsenyuk

Institute of nuclear researches NAN of Ukraine

Prospect Nauki, 47, Kiev-68, 03068. (380-44) 525-51-01, 525-46-92. prolisok77@yandex.ru

An integral optics arose up in connection with the necessity of creation of devices, which, taking all advantages in the transmission the signals on fiber-optic systems, would allow to conduct purposeful manipulations a radiation, acting from optical fiber on the entrance of integral-optical chart. The central element of integral optics is a waveguide (strip, planar, buried) generated in optically transparent environments. Therefore a main of technological task there is the forming of such waveguides. In order that light could spread on a waveguide, it is necessary, that the index of refraction in it was less, than in basic material.

For creation of integral-optical elements, suitable for the use in practical aims, a choice of successful technology is deciding. The idea of creation of waveguides ion-radial methods was based on possibility of purposeful change of structure of areas of optical material by an irradiation his different particles, that causes the change a density and, consequently, and index of refraction.

Such change of index of refraction can be conducted any particles, but for creation of high-quality waveguides with the small weakening of light wave it is necessary to take into account the processes what is going on. For creation of localized areas the positively charged particles: protons, deuteron and ions appeared most suitable; He^+ ions, electrons and other particles are very often used also. Ions are used as for conducting of structural changes, so, on occasion, and for introduction of alloying additions and realization of other chemical changes, including transmutation doping.

The most widespread materials, used in an integral optics, are electro-optical and magneto-optical crystalline dielectrics central from which is of lithium niobate, quartz and other glasses, semiconductors compound of type A_3B_5 and A_2B_6 .

One of perspective materials for an integral optics is the diphosphide zinc of tetragonal modification. Single crystal of this compound are no direct gap semiconductor with the energy gap width of 2.05 eV. Possess a high photosensitivity and show nonlinear optical activity. The unalloyed crystals have is a *p* — type of conductivity and changing the type of conductivity is possible by introduction of impurity of *Ga* or *Zn* in the process of growing.

Irradiation protons with energy 500 keV - 1 MeV to the doses 10^{16}cm^{-2} in a specially unalloyed and alloyed *Ge* single crystals of ZnP_2 allowed to get the layers of heterogeneity with a depth to 7 - 10 μm , which, probably, can, at further treatment, to prove as the strip waveguides formed in a crystal.