

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ СЛОЯ ОКСИДА ИНДИЯ-ОЛОВА
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРО-АБСОРБЦИОННОГО МОДУЛЯТОРА****В.И.Жарков****, К.О.Воропаев*, Б.И.Селезнев******THE DEVELOPMENT OF A PROCESS ION-PLASMA ETCHING OF AN INDIUM TIN OXIDE LAYER
TO FORM AN ELECTRO-ABSORPTION MODULATOR****V.I.Zharkov****, K.O.Voropaev*, B.I.Seleznev******АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород****Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Boris.Seleznev@novsu.ru*

Представлено исследование технологии формирования рельефа активной области электро-абсорбционного модулятора на основе слоя оксида индия-олова. В результате экспериментальных исследований авторами был выделен процесс ионно-плазменного травления в качестве оптимального варианта для создания рельефа с заданными геометрическими размерами. Также в работе рассмотрено влияние отжига в кислородной плазме на величину поверхностного сопротивления слоя оксида индия-олова, так как применение данной технологической операции позволит проводить более качественное удаление резистивной маски. Оценка глубины, а также вертикальности стенки полученного рельефа, проводилась методом растровой электронной микроскопии и представлена в виде РЭМ фотографий. Результатом исследований, представленных в статье, является метод ионно-плазменного травления слоя оксида индия-олова в среде аргона.

Ключевые слова: электро-абсорбционный модулятор, ионное-плазменное травление, оксид индия-олова (ITO), растровая электронная микроскопия (РЭМ), кислородная (O₂) плазма

In this article, the research of the technology of forming the topography of the active region of an electro-absorption modulator by ion-plasma etching of an indium tin oxide layer is presented. As a result of experimental studies, the authors identified the process of ion-plasma etching as the best option for creating a relief with necessary geometric dimensions. The paper also describes the effect of annealing in the oxygen (O₂) plasma on the value of the surface resistance of indium tin oxide, since the use of this technological operation will allow for better removal of the resistive mask. The depth and verticality of the wall of the etched region were estimated by scanning electron microscopy and presented in the form of SEM foto. The result of the research is the method of ion-plasma etching of a layer of indium-tin oxide in an argon medium.

Keywords: electro-absorption modulator, ion-plasma etching, indium tin oxide (ITO), scanning electron microscopy (SEM), oxygen (O₂) plasma

Введение

Для реализации интегрально-оптических схем (ИОС), выполняющих логические функции (например суммирования), требуется структурный элемент схемы, осуществляющий управление характеристиками оптического сигнала (амплитуда, фаза, поляризация, частота). Для осуществления такого рода преобразований применяются интегрально-оптические модуляторы. По принципу действия оптические модуляторы разделяются на акустооптические, в которых изменение показателя преломления происходит в зависимости от изменения давления, модуляторы на основе интерферометра Маха—Цендера с модуляцией светового потока по интенсивности, основанной на интерференции оптических мод, и магнитооптические, принцип действия которых базируется на реализации управления плоскостью поляризации с помощью магнитного поля. Особый интерес представляют электро-абсорбционные модуляторы (ЭАМ), так как они требуют наименьшее управляющее напряжение по сравнению с другими типами модуляторов, что значительно упрощает интеграцию и совместимость ЭАМ с ИОС, а также со-

вместимость ИОС с классическими интегральными схемами, например, схемами КМОП логики [1]. В основе принципа работы ЭАМ лежит эффект Франца—Келдыша, который заключается в сдвиге края собственного поглощения света в полупроводнике к меньшим частотам при наложении внешнего электрического поля [2].

Целью данной работы являлось формирование рельефа активной области ЭАМ на основе слоя оксида индия-олова (ITO). Следует отметить, что главными требованиями к формируемому рельефу являлись вертикальность стенки, а также воспроизведение линейных размеров структуры с точностью не хуже ± 5 нм.

Результаты экспериментальных исследований

В данной работе в качестве исходных образцов использовались кремниевые подложки с осажденным на них слоем оксида индия-олова. В основе структуры разработанного ЭАМ лежит кремниевый волновод с нанесенным на него слоем ITO (рис.1), так как современные исследования выделяют этот материал как наиболее перспективный с точки зрения электро-абсорбционных свойств [3].

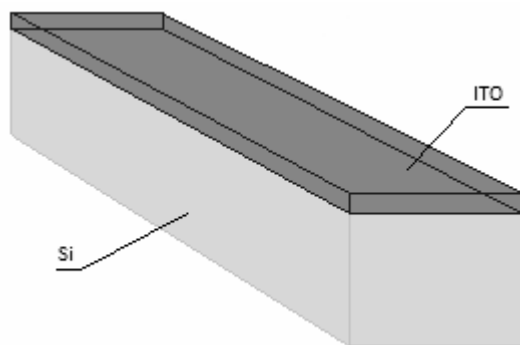


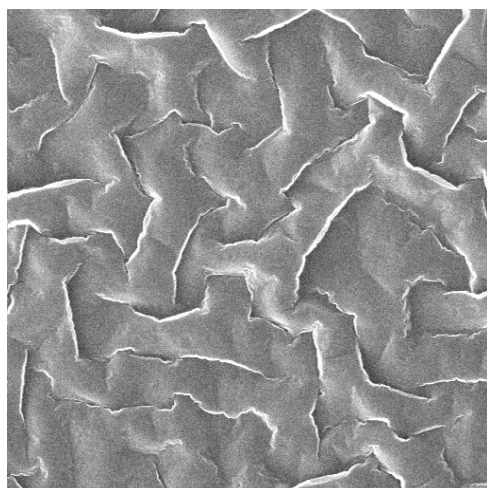
Рис.1. Схематичное представление конструкции волноводного слоя ЭА модулятора

Как показали экспериментальные исследования, проведенные в рамках данной работы, бомбардировка атомами аргона обеспечивает хорошую селективность при травлении ITO по отношению к кремнию, что с учетом малой толщины активной области (менее 100 нм) делает процесс ионно-плазменного травления наиболее удобным методом формирования рельефа данного ЭА модулятора.

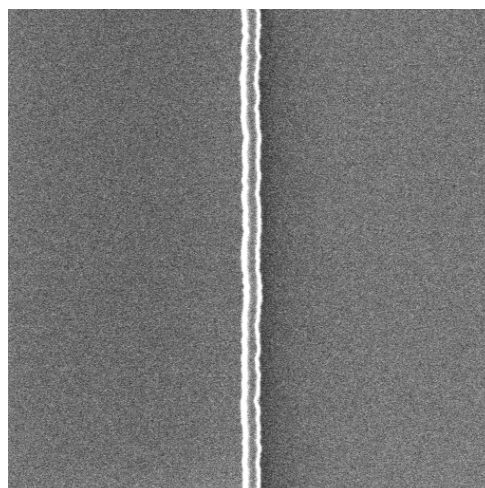
На первом этапе обработки травления активной области ЭАМ методом электронно-лучевой литографии был сформирован полосок из негативного резиста марки Allresist AR-N 7500 в качестве маски, имитирующей активную область модулятора. Для первого эксперимента был выбран процесс травления в среде аргона на установке Sentech SI 500 с ВЧ мощностью емкостного источника $RF = 275 \text{ W}$ и мощностью источника индуктивно-связанной плазмы $ICP = 200 \text{ W}$. Оценка сформированного рельефа осуществлялась при помощи метода растровой электронной микроскопии (РЭМ), полученные фотографии приведены на рис.2.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что в процессе ионно-плазменного травления произошел разогрев поверхности подложки, вследствие чего маска деградировала и значительно увеличилась шероховатость ее поверхности. Для решения этой проблемы была снижена мощность источника ICP до 100 W при прочих равных условиях. Результаты процесса травления представлены на рис.3.

Как выяснилось, резист при таком режиме травления сильно задубливается, и его последующее

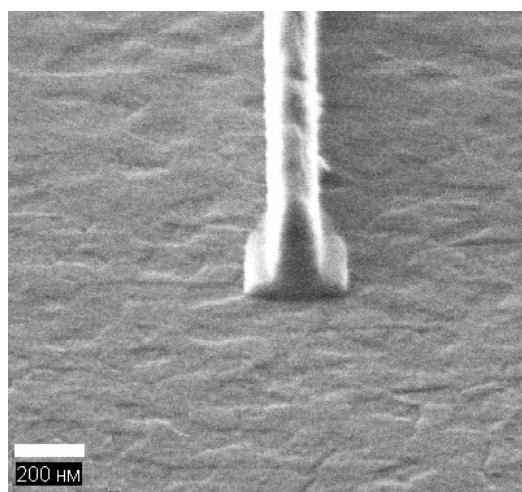


а)

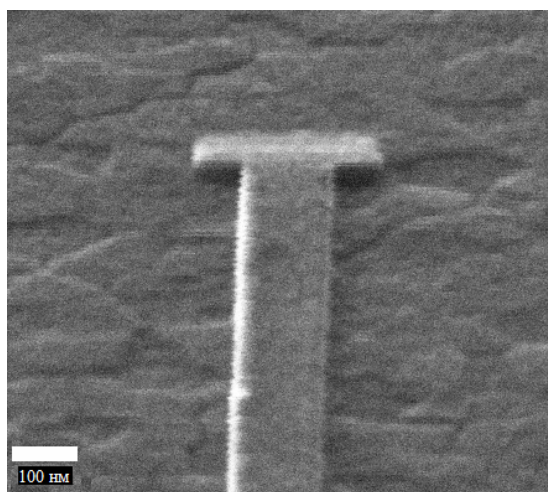


б)

Рис.2. РЭМ фотографии: а) поверхность негативного резиста после травления; б) форма вытравленной активной области модулятора



а)



б)

Рис.3. РЭМ фотографии вытравленного рельефа активной области: а) с маской из негативного резиста, б) без маски

удаление химическим способом затруднительно. В связи с этим мощности источников были снижены до значений $RF = 125$ W, $ICP = 50$ W. Результаты травления в данном режиме приведены на рис.4.

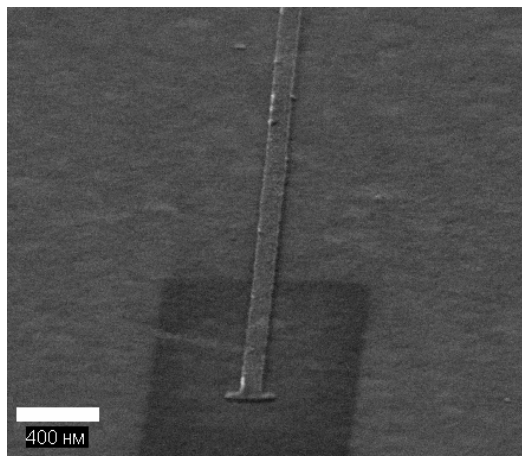


Рис.4. РЭМ фотография вытравленного рельефа активной области после снятия резистивной маски ($RF=125$ W, $ICP=50$ W)

Уменьшение мощности источников не решило проблему затрудненного снятия резистивной маски. Предполагается, как и ранее, что это связано с нагревом поверхности подложки в процессе травления.

На следующем этапе предыдущий процесс был разбит на десять итераций с промежуточным охлаждением между ними для исключения паразитного разогрева маски в процессе травления. Согласно ожиданиям, профиль поверхности сохранился (рис.5), но резистивная маска по-прежнему тяжело поддавалась химическому удалению.

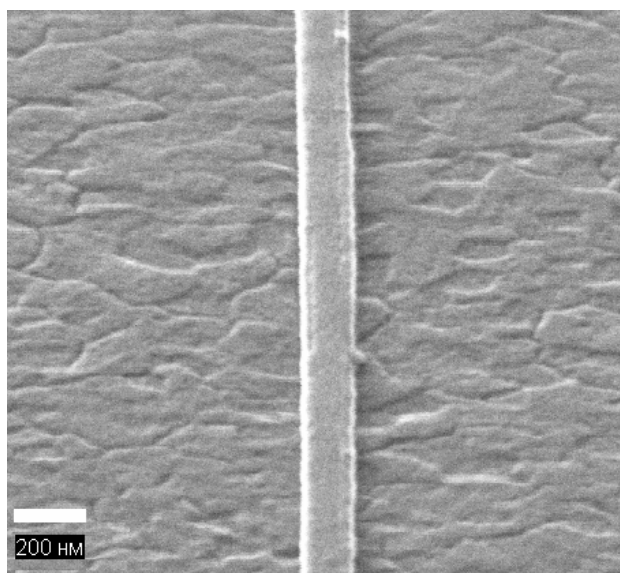


Рис.5. РЭМ фотография вытравленного рельефа активной области с удаленной резистивной маской по режиму с промежуточным охлаждением ($RF = 125$ W, $ICP = 50$ W)

Так как снижение мощности источников, а также использование промежуточного охлаждения не помогло решить проблему задубливания резистивной маски, было решено использовать режим с мощно-

стями источников $RF = 125$ W, $ICP = 50$ W без промежуточного охлаждения, а снятие резиста проводить в кислородной плазме.

При использовании данного метода удаления резиста возможна деградация характеристик ИТО. Для оценки влияния данных факторов был проведен ряд экспериментов по обработке слоя ИТО в кислородной плазме с последующим измерением значений поверхностного сопротивления четырехзондовым методом. Результаты экспериментов представлены в таблице.

Значения поверхностного сопротивления ИТО, Ом/□

До обработки в кислородной плазме	530
После обработки в кислородной плазме в течение 40 секунд	560
После обработки в кислородной плазме в течение 180 секунд	660

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что обработка ИТО в кислородной плазме в течение трех минут привела к увеличению значения поверхностного сопротивления слоя ИТО на 130 Ом/□. Данное отклонение связано с перераспределением заряда в приповерхностной области данного слоя. В свою очередь, перераспределение обусловлено изменением стехиометрии приповерхностной области вследствие встраивания атомов кислорода в решетку оксида индия-олова.

Таким образом, в результате проведенных исследований был получен режим ионно-плазменного травления активной области модулятора на основе оксида индия-олова, обеспечивающий вертикальность стенок формируемого рельефа, а также необходимую глубину травления. В результате последующего анализа полученных образцов было выявлено уширение активной области (ширина полосы на 20 нм больше, чем в разработанном дизайне). Предположительно это связано с «вуалью» из недопроявленного резиста, которая остается на сформированной маске. Такая версия является наиболее вероятной, так как увеличение активной области наблюдалось и при относительно «мягких» режимах травления (например, режим с мощностями источников $RF = 125$ W, $ICP = 50$ W с промежуточным охлаждением). Решением данной проблемы может стать применение подчистки в плазме резистивной маски перед ионно-плазменным травлением для удаления паразитной «вуали».

Заключение

В данной работе проведены эксперименты по подбору режима ионно-плазменного травления слоя оксида индия-олова для формирования активной области электро-абсорбционного модулятора. Разработан процесс травления, который обеспечивает требуемые глубину (менее 100 нм с точностью до 5 нм) и вертикальность стенки формируемого рельефа. Так как при таком травлении наблюдается задубливание резистивной маски, удаление резиста производится в кислородной плазме. В связи с тем, что при обработке в кислородной плазме возможны изменения характеристик ИТО, была проведена оценка влияния кислородной плазмы на поверхностное сопротивление слоя оксида индия-олова.

Публикация подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания, проект №3.3572.2017/ПЧ.

References

1. Amin R., George J.L., Sun S. et al. ITO-based electro-absorption for photonic neural activation function [Электронный ресурс] // APL Materials. 2019. V.7. Issue 8. Режим доступа: <https://doi.org/10.1063/1.5109039>.
2. Сидоров А.И. Основы фотоники: физические принципы и методы преобразования оптических сигналов в устройствах фотоники. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. С.51-52.
3. Алмосова Л.П. Электрооптические свойства и структурные особенности аморфного ИТО // Физика и техника полупроводников. 2015. №49(3). С.426-430.
1. R. Amin, J.L. George, S. Sun, T. Ferreira de Lima, A. N. Tait, J. B. Khurgin, M. Miscuglio, B. J. Shastri, P. R. Prucnal, T. El-Ghazawi, V. J. Sorger, ITO-based electro-absorption for photonic neural activation function. APL Materials. 2019, volume 7, issue 8. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5109039>.
2. Sidorov A. I. Osnovy fotoniki: fizicheskie printsipy i metody preobrazovaniya opticheskikh signalov v ustroystvakh fotoniki. [Fundamentals of photonics: physical principles and methods for converting optical signals in photonic device]. Saint Petersburg, SRU ITMO Publ., 2014, pp. 51-52.
3. Almosova L. P. Elektroopticheskie svoystva i strukturnye osobennosti amorfnogo ITO [Electro-optical properties and structural features of amorphous ITO]. Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 2015, no. 49(3), pp.426-430.