

УДК 621.382.2/.3: 681.518.5

Ю.А. Шурыгин, С.В. Ишуткин, Б.В. Ширяев, Ю.С. Жидик

Изготовление электрооптических модуляторов на основе InP для ВОЛС и проведение автоматизированного визуального контроля их поверхности на предмет наличия дефектов

Электрооптические модуляторы являются ключевыми элементами при построении волоконно-оптических линий связи. В работе представлены результаты разработки технологии изготовления электрооптических модуляторов Маха–Цендера на основе фосфида индия (InP). Разработанная технология была апробирована при изготовлении тестовых образцов электрооптических модуляторов с последующим проведением визуального контроля наличия дефектов на их поверхности в автоматизированном режиме с использованием разработанного и реализованного авторами алгоритма.

Ключевые слова: оптоэлектроника, электрооптический модулятор, фосфид индия, реактивное ионное травление, VCB, pin-диод, визуальный контроль, детектирование дефектов.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-3-21-27

Радиофотонные микросхемы находят широкое применение в средствах распознавания и зондирования, оптических средствах связи, средствах обработки оптических сигналов, биофотонике, телекоммуникационных сетях, средствах подключения к интернету и передачи данных, быстродействующей вычислительной технике и т.п. Одним из основных драйверов развития радиофотоники является рынок телекоммуникации [1, 2]. Пересылка все большего объема данных между пользователями, сохранение и скачивание их на удаленных серверах центров обработки данных – основной первичный источник нагрузки на магистральные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), при построении которых одними из ключевых элементов являются электрооптические модуляторы (ЭОМ).

При создании интегральных оптоэлектронных устройств InP является одним из базовых материалов, позволяющих создавать как активные, так и пассивные элементы [3]. Ряд производителей уже освоил промышленное производство электрооптических модуляторов на основе InP. Тем не менее разработка и оптимизация технологии изготовления таких устройств продолжают.

В современном производстве полупроводниковых приборов помимо задач их непосредственного изготовления важным является осуществление большого количества операций контроля их выходных параметров по косвенным, вторичным или непосредственным признакам [4, 5]. Неотъемлемой частью технологического контроля является контроль внешнего вида выпускаемой продукции на предмет отсутствия повреждений и загрязнений, точности повторения фотошаблона и др. [6]. Визуальный контроль часто проводится вручную, и, как следствие, данный этап отнимает много времени оператора и увеличивает себестоимость выпускаемой продукции. Решением данной проблемы является применение программного продукта, способного по полученным в автоматическом режиме микрофотографиям определять годность полупроводниковых приборов с большой скоростью.

Целью данной работы является разработка технологии изготовления электрооптического модулятора Маха–Цендера на основе InP с изготовлением опытных образцов модуляторов и осуществление автоматизированного визуального контроля их поверхности на предмет дефектов с использованием разработанного авторами алгоритма.

Структурная схема ЭОМ

Структурная схема изготавливаемого ЭОМ Маха–Цендера на основе InP представлена на рис. 1 [7].

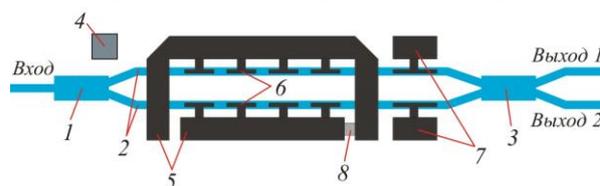


Рис. 1. Структурная схема ЭОМ Маха–Цендера на основе InP:

- 1 – оптический делитель; 2 – оптические волноводы;
- 3 – оптический сумматор; 4 – электрод смещения;
- 5 – электроды управления; 6 – секции электродов управления;
- 7 – электроды подстройки; 8 – резистор

В основе данного модулятора используется интерферометр Маха–Цендера, позволяющий выполнять амплитудную модуляцию оптического сигнала за счет управления фазовой скоростью оптических волн в каналах (плечах) интерферометра. На оптический вход модулятора подается постоянный оптический сигнал. Далее он попадает на интерферометр Маха–Цендера, состоящий из оптического делителя (см. рис. 1, поз. 1), двух оптических волноводов (плечи интерферометра, см. рис. 1, поз. 2) и оптического сумматора (см. рис. 1, поз. 3). Модулирующий СВЧ-сигнал поступает на электрический вход модулятора (см. рис. 1, поз. 5). Модулированный оптический сигнал снимается с оптических выходов. Модулирование амплитуды оптического сигнала осуществляется за счет управления фазовой скоростью световых волн в плечах интерферометра, что обеспечивается локальным изменением коэффициента преломления волноводов. В ЭОМ на основе InP для

этого используют квантово-размерный эффект Штарка [3]. Технически изменение коэффициента преломления осуществляется подачей напряжения смещения на $p-i-n$ -структуру в области каналов интерферометра (см. рис. 1, поз. 6). Для обеспечения работы модулятора в широком диапазоне частот управляющие электроды формируются в виде электродов бегущей волны. Задание режима работы модулятора обеспечивается подачей напряжения на электрод смещения (см. рис. 1, поз. 4). Электроды подстройки (см. рис. 1, поз. 7) используются для коррекции рабочей точки модулятора [8].

Методика эксперимента

Для изготовления ЭОМ Маха–Цендера в работе были использованы 3 дюймовые полуизолирующие подложки InP со сформированной на их поверхности $p-i-n$ -InP/InGaAsP-гетероструктурой. Области гетероструктуры p -InP и n -InP были сформированы с переменным профилем легирования. Область p -InP была легирована Zn с максимальным уровнем легирования $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, область n -InP была легирована Si с максимальным уровнем легирования $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В i области $p-i-n$ -структуры была сформирована MQW на основе InP/InGaAsP сверхрешетки общей толщиной 400 нм.

Создание ЭОМ на основе InP требует формирования волноводных структур с высоким аспектным соотношением и гладкой морфологией поверхности, при этом ширина формируемых элементов может быть менее 1 мкм [9, 10]. Поэтому в работе формирование элементов волноводов модулятора выполнялось методом реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме с использованием газовой смеси $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{N}_2$ 10/20/20 $\text{см}^3/\text{мин}$ по описанный в [11] технологии и откорректированной с учетом необходимости удаления образующегося в процессе травления соединения InCl_3 , обладающего низкой летучестью [12–14]. Величина мощности индуктивного разряда P_{ICP} составляла 700 Вт, мощности приложенной между электродами P_{RF} 100 Вт, давление в процессе травления 15 мТорр. Травление слоев гетероструктуры выполнялось по однослойной диэлектрической маске. Для этого на поверхность подложек методом плазмохимического осаждения из газовой фазы осаждалась пленка SiN_x требуемой толщины. Формирование элементов топологии в диэлектрике выполнялось методом реактивного ионного травления в плазме на основе SF_6 по однослойной маске фоторезиста.

Омические контакты к p -InGaAs- и n -InP-слоям гетероструктуры формировались методом электронно-лучевого испарения на основе металлизаций Ti/Pt/Au (50/25/400 нм) и Ni/Ge/Au (10/30/200 нм) соответственно. Отжиг омических контактов проводился на горячей плите в инертной среде.

Планаризация рельефа на поверхности подложки выполнялась с использованием пленки фоточувствительного бензоциклобутена (BCB). После полимеризации удаление избыточной толщины пленки BCB выполнялось с использованием реактивного

ионного травления в индуктивно-связанной плазме с использованием газовой смеси SF_6/O_2 .

Тонкопленочные резисторы NiCr формировались методом электронно-лучевого испарения. Межэлементная металлизация формировалась методом электрохимического осаждения пленки Au толщиной 3 мкм. В качестве подслоя для осаждения Au была использована двухслойная композиция Ti/Au 30/80 нм, получаемая методом электронно-лучевого испарения.

Для получения микроскопических изображений элементов модулятора использовались методы оптической и сканирующей электронной микроскопии.

После изготовления ЭОМ на полупроводниковой пластине InP производилась оценка степени их дефектности с использованием разработанного авторами алгоритма автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем на основе метода вычисления пиксельного расстояния [15].

В общем случае алгоритм оценки степени дефектности монолитных интегральных схем построен на качественном сравнении фотошаблона (далее – чертеж) и ее микрофотографии. Алгоритм анализирует разницу между ними, вызванную особенностями технологий изготовления и контроля: искаженная форма элементов, ошибки совмещения слоев, механические повреждения, оптические ошибки и погрешности микроскопии и др.

Выполняется алгоритм автоматизированного визуального контроля с использованием метода вычисления пиксельного расстояния по следующей последовательности:

- 1) поиск предварительно настроенных точек совмещения;
- 2) вычисление матрицы аффинного преобразования;
- 3) растеризация векторного чертежа с заливкой областей;
- 4) выделение области анализа из микрофотографии и растрованного чертежа;
- 5) преобразование выделенной области анализа микрофотографии монолитной интегральной схемы с использованием классификатора на основе искусственной нейронной сети;
- 6) вычисление карты дефектности, представляющей матрицу пиксельных расстояний от каждого пикселя области анализа чертежа до ближайшего пикселя преобразованной микрофотографии той же принадлежности;
- 7) определение наличия дефекта по карте дефектности.

Результатом работы алгоритма является карта дефектности монолитной интегральной схемы в масштабе микрофотографии, отображающая дефектные участки.

Изготовление ЭОМ

Технологический маршрут изготовления ЭОМ состоял из следующей последовательности технологических блоков:

- формирование диэлектрической маски SiN_x для травления волноводов (рис. 2, а);

- плазмохимическое травление *p*-слоев гетероструктуры по маске SiN_x (см. рис. 2, б);
- удаление диэлектрической маски SiN_x с пассивных элементов электрооптического тракта (см. рис. 2, в);
- плазмохимическое травление *p*- и *i*-слоев гетероструктуры по маске SiN_x (см. рис. 2, з);
- формирование диэлектрической маски SiN_x и последующее плазмохимическое травление *n*-слоев гетероструктуры для формирования межэлементной изоляции (см. рис. 2, д);
- формирование омического контакта Ni/Ge/Au к *n*-InP слою гетероструктуры (см. рис. 2, е);

- планаризация поверхности подложки пленкой BCB (см. рис. 2, ж);
- утонение пленки BCB и удаление SiN_x в окнах BCB плазмохимическим травлением;
- формирование омических контактов Ti/Pt/Au к *p*-InGaAs слою гетероструктуры и NiCr тонкопленочных резисторов (см. рис. 2, з);
- формирование межэлементной металлизации Ti/Au (см. рис. 2, и).

Топология изготавливаемого ЭОМ была спроектирована с применением подхода многопараметрической оптимизации ЭОМ на основе InP, изложенного в [7].

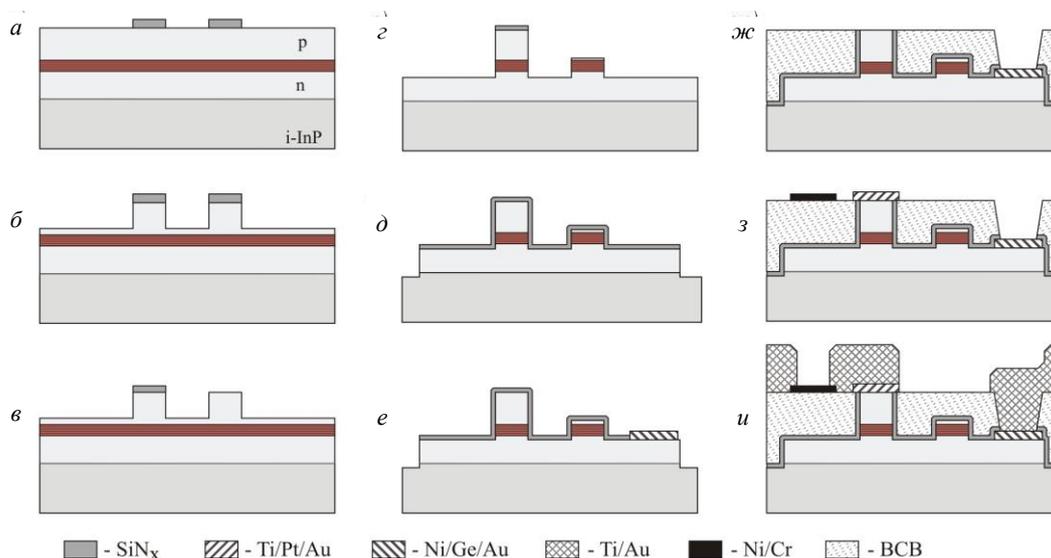


Рис. 2. Технологический маршрут изготовления ЭОМ Маха–Цендера на основе InP

На рис. 3 представлены микроскопические изображения элементов электрооптического тракта модуляторов после этапа формирования межэлементной изоляции. Элементы волноводов имели профиль, близкий к прямоугольному, и гладкую морфологию поверхности.

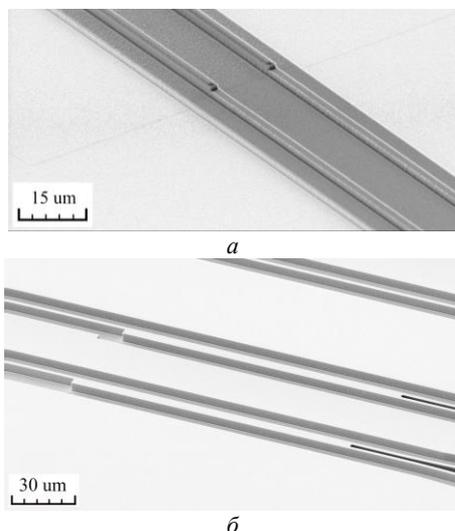


Рис. 3. Микроскопические изображения элементов электрооптического тракта ЭОМ на основе InP: а – отрезок фазосдвигающей секции; б – ММИ-делители

Далее на подложке были сформированы омические контакты *n*-InP-областям *p*-*i*-*n*-диодов модулятора. После отжига на плите металлизации Ni/Ge/Au (10/30/200 нм) при температуре 410 °С в течение 2 мин приведенное контактное сопротивление омического контакта составило $1,2 \cdot 10^{-6}$ Ом·см².

Следующим этапом осуществлялась планаризация поверхности подложки пленкой BCB. После травления в плазме SF₆/O₂ пленка BCB имела гладкую морфологию поверхности. Разнотолщинность пленки по поверхности подложки диаметром 3 дюйма не превышала 0,2 мкм.

Далее на подложке были сформированы верхние омические контакты *p*-*i*-*n*-диодов модулятора к *p*-InGaAs-областям. Оптимальным режимом отжига стал нагрев омических контактов до 300 °С в течение 10 мин, при этом достигается минимальное значение приведенного контактного сопротивления $5,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см². Отжиг омических контактов на подложках с планаризацией пленкой BCB показал отсутствие как деформации, так и растрескивания планаризирующего покрытия.

На рис. 4 представлено микроскопическое изображение отрезка металлизации Ti/Au. На рисунке видны внешние электроды и секции внутренних электродов электрически соединенных с *p*-контактами *p*-*i*-*n*-диодов фазосдвигающей секции

ЭОМ. Как видно из рисунка, слой ВСВ обеспечивает достаточный уровень планаризации поверхности подложки.

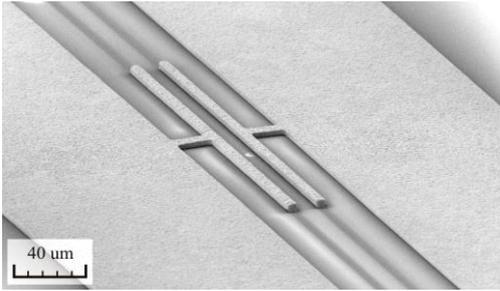


Рис. 4. Микроскопическое изображение отрезка микрополосковой линии на основе металлизации Ti/Au

На рис. 5 представлена фотография полупроводниковой пластины с изготовленными ЭОМ.

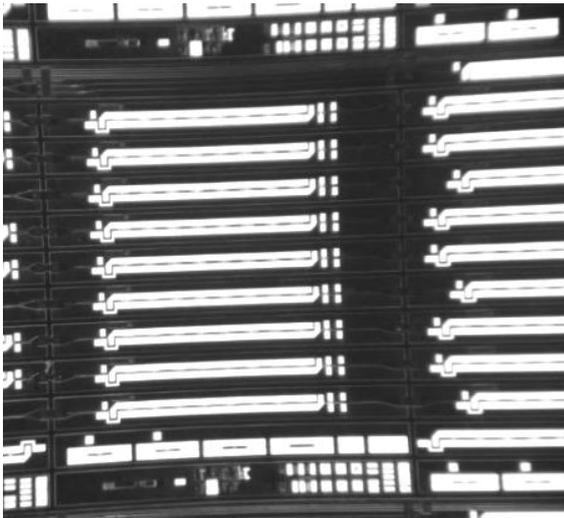


Рис. 5. Фотография участка полупроводниковой пластины с ЭОМ на основе InP

Автоматизированный визуальный контроль поверхности ЭОМ на предмет наличия дефектов

После изготовления ЭОМ с использованием разработанного и реализованного авторами алгоритма автоматизированного визуального контроля был проведен визуальный контроль поверхности модуляторов на предмет наличия дефектов.

Отличительной особенностью в работе алгоритма при визуальном контроле дефектов ЭОМ является настройка оптимальных параметров работы алгоритма. Это вызвано тем, что электрооптические модуляторы обладают значительно большими габаритными размерами кристалла (9,0×0,55 мм) по сравнению с ранее анализируемыми в [14] кристаллами СВЧ-монокристаллических интегральных схем. При этом ЭОМ содержит в своем составе элементы шириной менее 1 мкм.

К особенностям настройки алгоритма для проведения автоматизированного визуального контроля можно отнести следующие:

- использование 5 точек совмещения для оценки качества разработанного алгоритма коррекции набора точек совмещения при вычислении коэффициентов матрицы аффинного преобразования фотошаблона;
- ограничение области анализа топологией фазового модулятора для исключения ошибок при детектировании дефектов на границах кристалла;
- использование векторного фотошаблона группового исполнения для упрощения и ускорения настройки алгоритма;
- расширение диапазонов параметров исследования из-за существенного увеличения разрешения изображения.

Наличие на одной полупроводниковой пластине нескольких топологий электрооптического модулятора существенно упростило процесс настройки алгоритма для проведения автоматизированного визуального контроля, так как при изменении топологии требуется только настройка процесса совмещения фотошаблона и микрофотографии. Все остальные настройки (настройки искусственной нейронной сети, выделение области анализа, установка параметров ускорения поиска точек совмещения и др.) остаются неизменными.

Подробный пример результата работы алгоритма амортизированного визуального контроля поверхности кристалла ЭОМ приведён на рис. 6. На рис. 6, а и в изображены микрофотография годного кристалла ЭОМ и растриванный чертеж его топологии соответственно. Микрофотография тестируемого кристалла ЭОМ с дефектами на поверхности представлена на рис. 6, б. После ограничения области анализа микрофотографии бракованного кристалла ЭОМ топологией фазового модулятора для исключения ошибок при детектировании дефектов на границах кристалла (см. рис. 6, г) осуществляется вычисление карты дефектности. Результатом работы алгоритма является визуализированная карта дефектности в масштабе микрофотографии, отображающая дефектные участки исследуемого кристалла ЭОМ (см. рис. 6, д). Для удобства анализа результатов алгоритм позволяет выделить дефекты исследуемого кристалла ЭОМ (см. рис. 6, е).

Проведенный автоматизированный визуальный контроль сформированных ЭОМ на основе метода вычисления пиксельного расстояния показал удовлетворительную работу алгоритма. Повторяемость автоматизированного визуального контроля внешнего вида кристалла ЭОМ и ручного визуального контроля составила более 80%.

В целом проведение автоматизированного визуального контроля микрофотографий ЭОМ, изготовленных на полупроводниковой пластине диаметром 3 дюйма (рис. 5), показало наличие дефектных участков (повреждение металлизации, остатки фоторезиста и т.д.) на поверхности 16% кристаллов ЭОМ от общего изготовленного количества на полупроводниковой пластине.

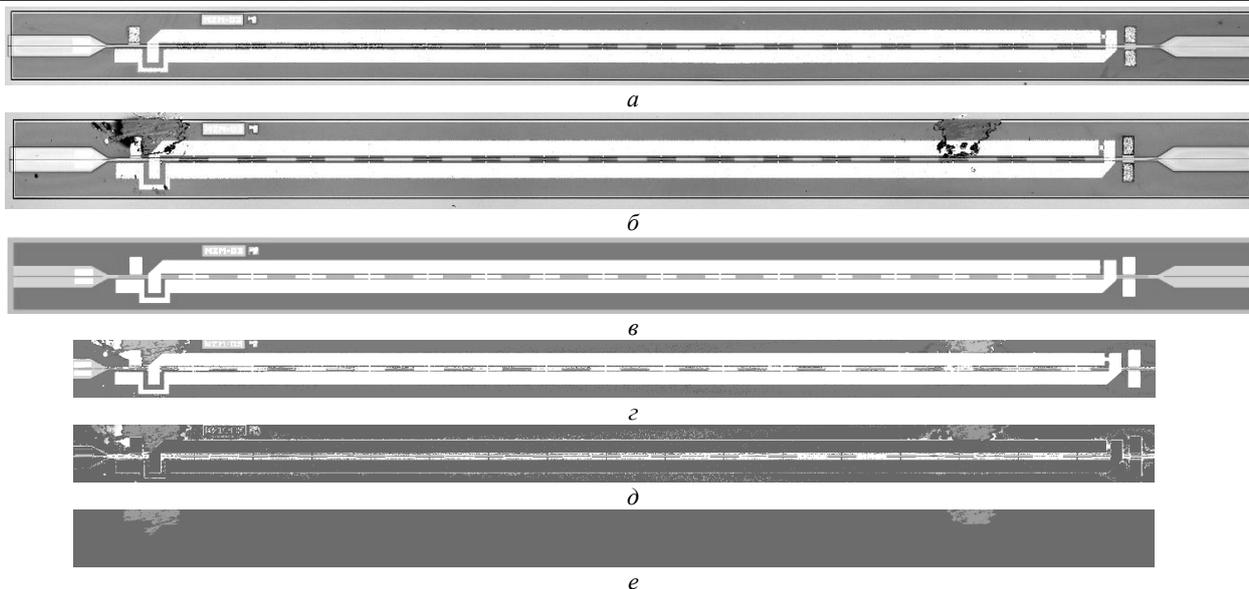


Рис. 6. Пример результата работы алгоритма амортизированного визуального контроля поверхности ЭОМ: *а* – микрофотография годного кристалла ЭОМ; *б* – микрофотография бракованного кристалла ЭОМ с дефектами; *в* – растринированное изображение фотошаблона; *г* – преобразованная область анализа микрофотографии бракованного кристалла ЭОМ с дефектами; *д* – карта дефектности бракованного кристалла ЭОМ; *е* – выделенные дефекты бракованного кристалла ЭОМ

Заключение

В рамках работы была разработана технология изготовления электрооптических модуляторов Маха–Цендера на основе InP. Показана возможность формирования омического *p*-контакта Ti/Pt/Au к *p*-InGaAs-слою после планаризации поверхности подложки пленкой ВСВ. При этом после отжига омического контакта деформация и растрескивание планаризирующей пленки ВСВ отсутствовали.

Показано, что при настройке оптимальных параметров работы разработанного авторами алгоритма автоматизированного визуального контроля поверхности кристаллов монолитных интегральных схем алгоритм с высокой достоверностью позволяет выявлять наличие дефектных участков кристаллов электрооптических модуляторов Маха–Цендера. Проведение автоматизированного визуального контроля микрофотографий изготовленных электрооптических модуляторов выявило наличие дефектных участков на поверхности 16% кристаллов.

Работа выполнена коллективом научной лаборатории интегральной оптики и радиофоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-03-2020-237/1 от 05 марта 2020 г. (внутренний номер проекта FEWM-2020-0040), а также с поддержкой в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030». Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» (регистрационный номер 200568).

Литература

1. Cisco Annual Internet Report. Available online: Cisco Annual Internet Report [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>, свободный (дата обращения: 19.09.2022).

2. NOKIA Who Will Satisfy the Desire to Consume? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://readymag.com/BellLabs/480968/>, свободный (дата обращения: 19.09.2022).

3. Status and progress in InP optoelectronic processing: Toward higher levels of integration / J.L. Pleumeekers, R.P. Schneider, A. Mathur, S.K. Hurtt, P.W. Evans, A.G. Dentai, C.H. Joyner, D.J.H. Lambert, S. Murthy, R. Muthiah // Proceedings of the International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology. – Vancouver: CS Mantech, 2006. – P. 115–118.

4. Классификатор изображений микросхем при помощи сверточной нейронной сети / С.А. Сарманбетов, А.А. Максимова, Д.М. Жексебай, Е.Т. Кожугулов // Известия НАН РК. Сер.: Физика и информационные технологии. – 2021. – Т. 6, № 340. – С. 59–65.

5. Lee K.B. Convolutional Neural Network for Fault Classification and Diagnosis in Semiconductor Manufacturing Processes / K.B. Lee, S. Cheon, C. Kim // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. – 2017. – Vol. 30, No. 2. – P. 135–142. DOI: 10.1109/TSM.2017.2676245

6. Мишанов Р.О. Визуальный контроль КМОП-микросхем // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: Изд-во ООО «Артель», 2017. – С. 201–203.

7. Multi-Parameter optimization of an InP electro-optic modulator / M. Stepanenko, I. Yunusov, V. Arykov, P. Troyan, Y. Zhidik // Symmetry. – 2020. – Vol. 12, No. 11. – P. 1–18.

8. Optical quantum-confined Stark effect in GaAs quantum wells / D. Fröhlich, R. Wille, W. Schlapp, G. Weimann // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 59, No. 15. – P. 1748–1751.

9. Smit M. Past, present, and future of InP-based photonic integration / M. Smit, K. Williams, J. van der Tol // APL Photon. – 2019. – Vol. 4. – P. 050901.

10. InP-based foundry PICs for optical interconnections / F.M. Soares, M. Baier, T. Gaertner, N. Grote, M. Moehrle, T. Beckerwerth, P. Runge, M. Schell // Appl. Sci. – 2019. – Vol. 9. – P. 1588.

11. Плазмохимическое травление InP/InGaAs гетероструктуры в индуктивно связанной плазме Cl₂/Ar/N₂ для

формирования оптических волноводных структур / С.В. Ишуткин, В.С. Арыков, Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 28–32.

12. A widely-tunable high-speed transmitter using an integrated SGDBR laser-semiconductor optical amplifier and Mach-Zehnder modulator / J.S. Barton, E.J. Skogen, M.L. Masanovic, S.P. Denbaars, L.A. Coldren // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2003. – Vol. 9. – P. 1113–1117.

13. Indium phosphide photonic integrated circuits for free space optical links / H. Zhao, S. Pinna, B. Song, L. Megalini, S.T.S. Brunelli, L.A. Coldren // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2018. – Vol. 24. – P. 1–6.

14. Ozaki J. High-speed modulator for next-generation large-capacity coherent optical networks // J. Ozaki, Y. Ogiso, S. Nakano // Ntt Tech. Rev. – 2018. – Vol. 16. – P. 1–8.

15. Ширяев Б.В. Алгоритм автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем с использованием искусственных нейронных сетей / Б.В. Ширяев, А.Ю. Ющенко, А.В. Безрук // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 72–76.

Шурыгин Юрий Алексеевич

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. компьютерных систем в управлении и проектировании
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-8819-0694
Тел.: + 7 (382-2) 51-05-30
Эл. почта: office@tusur.ru

Ишуткин Сергей Владимирович

Канд. техн. наук, вед. н.с. лаб. интегральной оптики и радиодифракции (ЛИОР) каф. физической электроники (ФЭ) ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-4468-346X
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: ishsv@mail.ru

Ширяев Борис Владимирович

М.н.с. ЛИОР каф. ФЭ ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-7367-9021
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: harger.net@mail.ru

Жидик Юрий Сергеевич

Канд. техн. наук, вед. н.с. ЛИОР каф. ФЭ ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-7803-2086
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: zhidikyur@mail.ru

Shurygin Yu.A., Ishutkin S.V., Shiryayev B.V., Zhidik Y.S.

Manufacture of InP-based electro-optical modulators for FOCL and automated visual inspection of their surface for defects

Electro-optical modulators are key elements in the construction of fiber-optic communication lines. In this work, the authors developed a technology for manufacturing Mach-Zehnder

electro-optical modulators based on InP. The developed technology was tested while manufacturing test samples of electro-optical modulators. The defects on the surface of the samples were visually inspected in an automated mode using the algorithm developed by the authors.

Keywords: optoelectronics, electro-optical modulator, indium phosphide, reactive ion etching, HCB, pin diode, visual inspection, defect detection.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-3-21-27

References

1. Cisco Annual Internet Report. Available online: Cisco Annual Internet Report. Available at: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (Accessed: September 19, 2022).

2. NOKIA Who Will Satisfy the Desire to Consume? Available at: <https://readymag.com/BellLabs/480968/> (Accessed: September 19, 2022).

3. Pleumeekers J.L., Schneider R.P., Mathur A., Hurtt S.K., Evans P.W., Dentai A.G., Joyner C.H., Lambert D.J.H., Murthy S., Muthiah R. Status and progress in InP optoelectronic processing: Toward higher levels of integration. *Proceedings of the International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology. Vancouver: CS Man-tech*, 2006, pp. 115–118.

4. Sarmanbetov S.A., Maksutova A.A., Zheksebay D.M., Kozhagulov E.T. [Classifier of microcircuit images using a conventional neural network]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physics and Information Technology Series*, 2021, vol. 6, no. 340, pp. 59–65 (in Russ.).

5. Lee K.B., Cheon S., Kim C. Convolutional Neural Network for Fault Classification and Diagnosis in Semiconductor Manufacturing Processes. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 135–142.

6. Mishanov R.O. Vizual'nyy kontrol' KMOP-mikroskhem [Visual inspection of CMOS chips]. Aktual'nyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy. Materialy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Actual problems of radio electronics and telecommunications. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Samara, Artel LLC Publ., 2017, pp. 201–203 (in Russ.).

7. Stepanenko M., Yunusov I., Arykov V., Troyan P., Zhidik Y. Multi-Parameter optimization of an InP electro-optic modulator. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no 11, pp. 1–18.

8. Fröhlich D., Wille R., Schlapp W., Weimann G. Optical quantum-confined Stark effect in GaAs quantum wells. *Physical Review Letters*, 1987, vol. 59, no 15, pp. 1748–1751.

9. Smit M., Williams K., van der Tol J. Past, present, and future of InP-based photonic integration. *APL Photon*, 2019, vol. 4, pp. 050901.

10. Soares F.M., Baier M., Gaertner T., Grote N., Moehrle M., Beckerwerth T., Runge P., Schell M. InP-based foundry PICs for optical interconnections. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, pp. 1588.

11. Ishutkin S.V., Arykov V.S., Zhidik Y.S., Troyan P.E. [Inductively coupled plasma etching of InP/InGaAs heterostructure for optical waveguide structures]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 28–32 (in Russ.).

12. Barton J.S., Skogen E.J., Masanovic M.L., Denbaars S.P., Coldren L.A. A widely-tunable high-speed transmitter using an integrated SGDBR laser-semiconductor optical amplifier and Mach-Zehnder modulator. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, vol. 9, pp. 1113–1117.

13. Zhao H., Pinna S., Song B., Megalini L., Brunelli S.T.S., Coldren L.A. Indium phosphide photonic integrated circuits for free space optical links. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, vol. 24, pp. 1–6.

14. Ozaki J., Ogiso Y., Nakano S. High-speed modulator for next-generation large-capacity coherent optical networks. *Ntt Tech. Rev.*, 2018, vol. 16, pp. 1–8.

15. Shiryaev B.V., Yushchenko A.Yu., Bezruk A.V. [Algorithm for automated visual inspection of monolithic integrated circuits using neural networks]. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 72–76 (in Russ.).

Yury A. Shurygin

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Head, Department of Computer Control Systems and Design,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-8819-0694
Phone: + 7 (382-2) 51-05-30
Email: office@tusur.ru

Sergey V. Ishutkin

Candidate of Science in Engineering, Leading Researcher
of Integrated Optics and Microwave Photonics Laboratory
(LIOMP), TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: ishsv@mail.ru

Boris V. Shiryaev

Junior Research Fellow, LIOMP, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-7367-9021
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: harger.net@mail.ru

Yuriy S. Zhidik

Candidate of Science in Engineering, LIOMP, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-7803-2086
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: zhidikyur@mail.ru