

Оптимизация конфигурации интегрального акустооптического преобразователя ТЕ-ТМ мод на подложке из ниобата лития X-среза

А.В. Варламов^{1,2}, В.В. Лебедев¹, П.М. Агрузов¹, И.В. Ильичев¹, А.В. Шамрай¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация: рассмотрена оптимизация параметров (выбор материала электродов встречно штыревого преобразователя (ВШП), выбор угла поворота ВШП относительно оси Z, выбор количества электродов ВШП, выбор длины перекрытия электродов ВШП) интегрального акустооптического преобразователя ТЕ-ТМ мод на подложке из ниобата лития. Для определения оптимальных параметров использовались методы исследования: измерения параметров ВШП векторным анализатором цепей, снятия частотных зависимостей преобразования поляризаций и наблюдение дифракции пучка на создаваемой ПАВ решетке. Результаты измерений этими методами позволили получить информацию о возбуждении поверхностной акустической волны (ПАВ), её распределении и взаимодействии с оптическим полем в волноводе. Они с высокой точностью соотносились друг с другом и известными из литературы данными и могут быть использованы для оптимизации и контроля качества различных устройств на ПАВ.

Ключевые слова: поверхностная акустическая волна, встречно штыревой преобразователь, преобразователь ТЕ-ТМ мод, ниобат лития, интегральная оптика

1. Введение

Поверхностные акустические волны (ПАВ) широко используются для создания акустооптических устройств в интегральном исполнении [1]. Локализация оптического излучения в оптическом волноводе и ПАВ на поверхности подложки обеспечивают высокую эффективность акустооптического взаимодействия. Ниобат лития (НЛ) благодаря своим пьезоэлектрическим свойствам и отработанной промышленной технологии изготовления оптических волноводов является основным материалом для создания акустооптических модуляторов в интегральном исполнении [2]. В качестве критерия оптимизации таких устройств выступает эффективность акустооптического преобразования [3–5]. Исходя из этого, интегральное акустооптическое устройство оптимальной конфигурации должно сочетать в себе высокую эффективность возбуждения ПАВ, локализацию ПАВ в области оптического волновода и достаточную длину. В данной работе мы рассмотрели параметры акустооптического устройства, подбор которых обеспечивает выполнение указанных требований. Так, выбор материала (золото или алюминий) и количества электродов позволяет обеспечить высокую эффективность возбуждения ПАВ, а выбор угла поворота и длины перекрытия электродов ВШП – локализацию ПАВ в области оптического волновода.

Для определения оптимальных параметров проведены измерения параметров ВШП векторным анализатором цепей, снятия частотных зависимостей преобразования поляризаций и наблюдение дифракции пучка с длиной волны 532 нм на создаваемой ПАВ решетке.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Была выбрана конфигурация интегрального акустооптического преобразователя ТЕ-ТМ поляризационных мод со сдвигом частоты, показанного на рисунке 1, представляющего собой монокристаллическую пластину НЛ Х-среза, на поверхности которой методом термической диффузии титана [6] вдоль кристаллографического направления Y сформирован каналный оптический волновод (одномодовый для 1550 нм). ВШП были изготовлены на поверхности волновода методом магнетронного напыления. Расстояние между центрами электродов 10 мкм соответствовало возбуждению акустических волн в диапазоне частот 150–250 МГц. Было изготовлено несколько образцов с ВШП толщиной 200 нм с различными компенсационными углами между электродами и осью Z ниобата лития. ВШП из золота и алюминия с 17 электродами (компенсационный угол от 0° до 5°) с длиной перекрытия 1,7 мм, а также ВШП из алюминия с 40 электродами (компенсационный угол 5°) с длиной перекрытия 100 мкм с акустическим волноводом [7]. Стенки акустического волновода были сформированы методом термической диффузии титана параллельно оптическому волноводу на расстоянии 50 мкм с каждой из сторон. Акустический волновод был необходим для предотвращения расхождения ПАВ в связи с малой длиной перекрытия электродов. Образцы были состыкованы с оптическим волокном методом приклейки в торец. Области стыковки одновременно служили поглотителями ПАВ и обеспечивали для них режим бегущей волны.

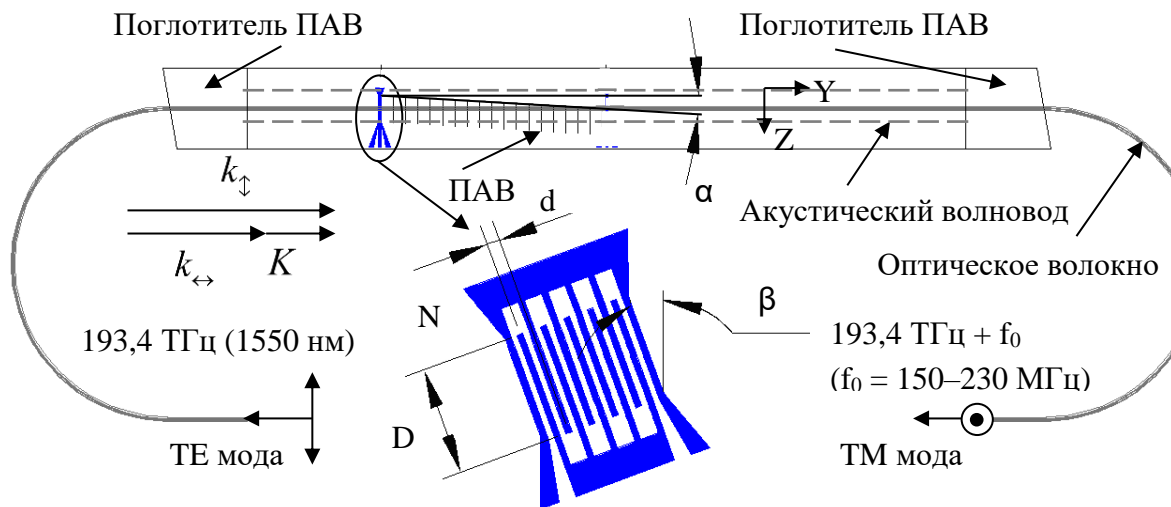


Рисунок 1. Конфигурации образца преобразователя ТЕ-ТМ мод и ВШП ($D = 1,7$ мм или 100 мкм – длина перекрытия электродов, $d = 10$ мкм – расстояние между центрами соседних электродов, $N = 17$ или 40 – число электродов, $\beta = 0-5^\circ$ – компенсационный угол между электродами и осью Z, $\alpha = 4.2^\circ$ – угол между направлением распространения ПАВ и нормалью к её фазовому фронту [7] для $\beta = 0^\circ$).

Векторный анализатор цепей использовался для измерения S-параметров ВШП. Измерялись электрические S-параметры (S_{11} – отражение сигнала) и сдвиг фазы между поданным и отраженным сигналом. По этим параметрам вычислялась комплексная проводимость ВШП.

Для наблюдения преобразования поляризаций в устройстве на вход его волновода подавалось лазерное излучение с длиной волны 1550 нм или 1505 нм и мощностью 0,2 мВт с ТЕ поляризацией. Переменный сигнал с мощностью до 25 дБм и частотой от 150 МГц до 250 МГц прикладывался к ВШП для возбуждения ПАВ. На выходе

волновода был установлен поляризатор, после которого измерялась мощность ТЕ поляризации, прошедшей без преобразования. Оценка эффективности преобразования поляризаций проводилась по отношению разности мощностей ТЕ поляризации на выходе до и после преобразования к мощности ТЕ поляризации на входе.

На рисунке 2 приведены частотные зависимости действительной части комплексной проводимости золотых и алюминиевых ВШП с 17 электродами и длиной перекрытия 1,7 мм (частотные зависимости для компенсационных углов $\beta = 0-5^\circ$ идентичны). Также на рисунке 2 приведена частотная зависимость относительной выходной мощности ТЕ моды для образца с алюминиевыми ВШП с 17 электродами и длиной перекрытия 1,7 мм при мощности ВЧ сигнала 21 дБм.

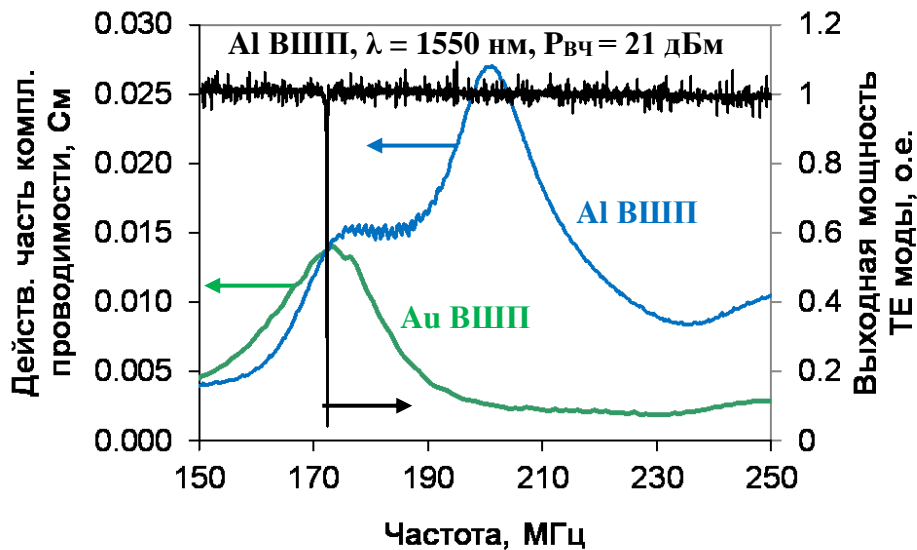


Рисунок 2. Частотные зависимости действительной части комплексной проводимости для золотых и алюминиевых ВШП с 17 электродами и длиной перекрытия 1,7 мм (левая шкала), частотная зависимость акустооптического преобразования поляризации внутри оптического волновода (правая шкала).

Приведённые на рисунке 2 частотные зависимости проводимостей золотых и алюминиевых ВШП одной конфигурации существенно различаются. Было установлено, что на частотных зависимостях проводимостей имеются пики, соответствующие ПАВ (175 МГц) и псевдоПАВ [8] (200 МГц). Конечные частотные зависимости проводимостей определяются параметрами пиков для ПАВ и псевдоПАВ. На золотых ВШП наблюдалось смещение пика проводимости для псевдоПАВ. Было установлено, что наличие золотых электродов на поверхности ниобата лития снижает скорость псевдоПАВ. При этом резонансная частота возбуждения замедленной псевдо ПАВ близка к частоте возбуждения ПАВ, из-за чего на результирующей частотной зависимости проводимости эти два пика сливаются. Отметим, что в этом случае взаимодействие замедленной псевдоПАВ и ПАВ может приводить к дополнительным шумам в оптическом тракте модулятора. На алюминиевых электродах вкладом замедленной псевдоПАВ можно пренебречь, и, соответственно, влияние псевдо ПАВ на оптический сигнал в волноводе пренебрежимо мало [9] и связано только со снижением эффективности возбуждения ПАВ за счет потери энергии.

Дифракционные измерения подтвердили результаты анализа частотных зависимостей проводимостей ВШП. Для электродов, параллельных оси Z, вектор дифракционной решётки, создаваемой ПАВ, параллелен оси Y, а вектор дифракционной решётки, создаваемой псевдоПАВ, повернут по часовой стрелке

примерно на 20° относительно оси Y . На образцах с золотыми электродами дополнительно наблюдался дифракционный максимум, период которого соответствовал ПАВ, но вектор решётки был повернут по часовой стрелке примерно на 20° относительно оси Y , как у псевдоПАВ. Результаты эксперимента показали, что из-за замедления псевдо ПАВ начинается генерация ещё одной ПАВ. В области ВШП происходит взаимная перекачка энергии этой ПАВ и псевдоПАВ из-за близости скоростей ПАВ и замедленной псевдоПАВ. Соотношение энергий в них зависит от частоты сигнала, поданного на ВШП.

Приведённая на рисунке 2 частотная зависимость преобразования поляризаций показала почти полное (95%) преобразование на резонансной частоте в области генерации ПАВ и отсутствие преобразования на частотах в области генерации псевдоПАВ. Наименьшая необходимая для полного преобразования поляризаций мощность ВЧ сигнала (21 дБм) достигалась у образцов с ВШП, повернутыми на компенсационный угол $\beta = 5^\circ$. Данный компенсационный угол обеспечивал распространение ПАВ вдоль оптического волновода, что было подтверждено посредством сканирования поверхности образца лазерным пучком с длиной волны 532 нм и наблюдением дифракции на созданной ПАВ решетке.

На рисунке 3 приведена частотная зависимость действительной части комплексной проводимости алюминиевого ВШП с 40 электродами, длиной перекрытия 100 $\mu\text{м}$, компенсационным углом 5° и акустическим волноводом. Также на рисунке 3 приведены частотные зависимости преобразования поляризаций (при длинах волн 1505 нм и 1550 нм) для этого образца при мощности ВЧ сигнала 15 дБм.

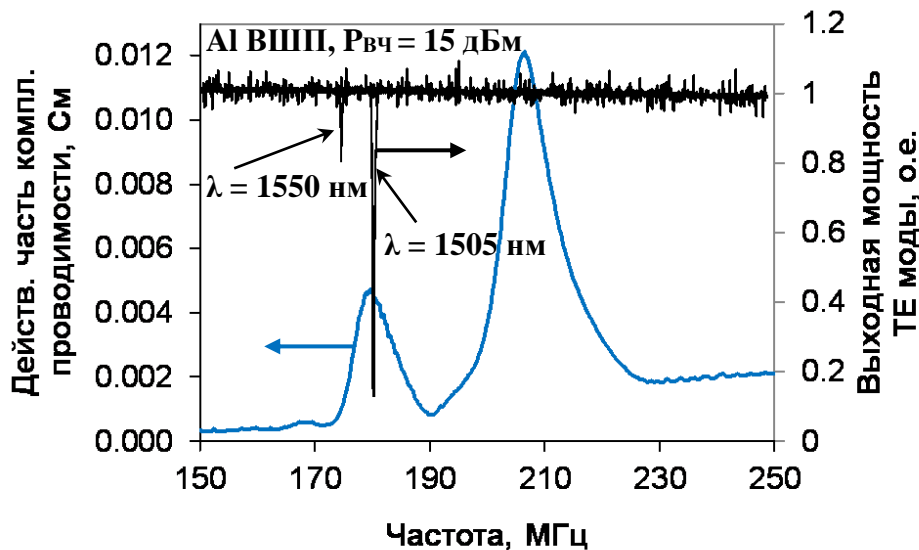


Рисунок 3. Частотная зависимость действительной части комплексной проводимости для алюминиевого ВШП с 40 электродами с длиной перекрытия 100 $\mu\text{м}$ (левая шкала), частотные зависимости акустооптического преобразования поляризации при длинах волн 1505 нм и 1550 нм внутри оптического волновода (правая шкала).

Из приведённой на рисунке 3 частотной зависимости проводимости можно сделать вывод, что увеличение количества электродов приводит к сужению пиков проводимостей, что позволяет различить отдельные пики, соответствующие ПАВ и псевдоПАВ. Это обеспечивает более эффективное возбуждение ПАВ, так как ВЧ сигнал не теряется при сопутствующем возбуждении псевдоПАВ. Также на частотной зависимости проводимости можно наблюдать смещение пиков резонансного возбуждения ПАВ (180 МГц) и псевдоПАВ (207 МГц) в сторону более высоких частот вследствие распространения в акустическом волноводе.

Исходя из частотных зависимостей преобразования поляризаций, приведённых на рисунке 3, видно, что уменьшение длины перекрытия электродов и увеличение числа штырей уменьшает необходимую для полного преобразования поляризаций мощность ВЧ сигнала (15 дБм), но накладывает более жесткие требования на точность подбора периода ВШП из-за сужения и смещения пика резонансного возбуждения ПАВ. Так, в данном случае, в результате рассогласования резонансных частот возбуждения ПАВ и преобразования поляризаций, более эффективное преобразование происходит в области длин волн 1505 нм вместо 1550 нм.

3. Заключение

На основе проведённых результатов исследований можно сделать выводы об оптимальной конфигурации интегрального акустооптического преобразователя ТЕ-ТМ мод на подложке из ниобата лития X-среза.

Во-первых, вследствие не параллельности направления распространения ПАВ и нормали к её фазовому фронту, электроды ВШП должны быть повернуты относительно оси Z на компенсационный угол. Его оптимальное значение, обеспечивающее распространение ПАВ вдоль оптического волновода, было определено – 5° .

Во-вторых, помимо модулирующей оптический сигнал ПАВ, значительная энергия электрического ВЧ сигнала может уходить на возбуждение паразитных псевдоПАВ и замедленной псевдоПАВ. Для ВШП, изготовленного из золота, частота резонансного возбуждения замедленной псевдо ПАВ близка к частоте возбуждения ПАВ, что приводит к их взаимодействию и является источником дополнительных шумов в оптическом сигнале. В связи с этим, электроды ВШП следует выполнять из алюминия, а не золота.

В-третьих, уменьшение длины перекрытия электродов с выполнением акустооптического волновода и увеличение количества электродов позволяет повысить эффективность акустооптического взаимодействия за счёт концентрации энергии ПАВ в области оптического волновода. Однако вместе с этим ужесточаются требования к точности выполнения ВШП.

Список литературы

1. Malocha, D. C. Surface acoustic wave applications / Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2001.
2. Turner, E. H. High-frequency electro-optic coefficients of lithium niobate // Applied Physics Letters. — 1966. — Vol. 8.11. — P. 303 – 304.
3. Ohmachi, Y. LiNbO₃ TE-TM mode converter using collinear acoustooptic interaction / Y. Ohmachi, [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1977. — Vol. 13.2. — P. 43 – 46.
4. Liu, T. Collinear Surface Acoustic Wave Acousto-Electro-Optic Modulator in Ti: LiNbO₃ Waveguide / T. Liu, [et al.] // Photonics and Optoelectronic (SOPO), 2010 Symposium on. IEEE. — 2010.
5. Varlamov, A. V. Search for Optimal Conditions of SAW Excitation by Lithium Niobate Integrated Optical TE-TM Mode Converter / A. V. Varlamov, [et al.] // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). — IEEE, 2018. — P. 172 – 175.
6. Karavaev, P. M. Polarization separation in titanium-diffused waveguides on lithium niobate substrates / P. M. Karavaev, [et al.] // Technical Physics Letters. — 2016. — Vol. 42.5. — P. 513 – 516.
7. Yang, J. Optimal design of integrated acousto-optic tunable filters based on investigation of SAW in acoustic waveguide / Jisheng Yang, [et al.] // Photorefractive Fiber and Crystal Devices: Materials, Optical Properties, and Applications. — 2006. — Vol. 6314. — P. 63140U-1 – 63140U-7.
8. Peverini, O. A. Full-wave modeling of piezoelectric transducers for SAW acousto-optical interactions / O. A. Peverini, [et al.] // Optical and quantum electronics. — 2000. — Vol. 32.6-8. — P. 855 – 867.
9. Kakio, S. Acousto-optic modulator driven by surface acoustic waves // Acta Physica Polonica A. — 2015. — Vol. 127.1. — P. 15 – 19.