

*Лебедев В.В., Ильичев И.В., Каретко В.С., Шамрай А.В.  
Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН*

## **Анализ конфигурации интегрально-оптического СВЧ модулятора**

*Представлен анализ конфигурации СВЧ электродов бегущей волны интегрально оптического модулятора на основе канальных оптических волноводов на подложке ниобата лития Х-среза. Материал электродов - серебро. В анализе использовалось приближение длинных линий, где для определения погонных характеристик электродов использовался численный анализ на основе метода конечных элементов. Изучено влияние вариации характеристик электродов и их геометрии на эффективный показатель преломления СВЧ волны в структуре и рабочую полосу частот модулятора.*

**Ключевые слова:** интегрально-оптический модулятор, ниобат лития, электроды бегущей волны, радиофотоника.

Сверхвысокочастотная оптоэлектроника (радиофотоника), является новой, бурно развивающейся областью современных информационно-телекоммуникационных технологий, появившаяся в результате интеграции оптоэлектроники и СВЧ-радиоэлектроники. Данное направление может быть охарактеризовано как направление СВЧ техники, в котором параметры систем и устройств радиодиапазона совершенствуются с помощью методов и средств оптического диапазона, а оптическая техника использует методы и средства развитые для систем СВЧ диапазона. Высокая частота оптической несущей ( $\sim 10^{15}$  Гц), огромная полоса пропускания оптических систем (более 10 ТГц), низкие потери в оптических волноводах (волокне) (менее 0,5 дБ/км), а также невосприимчивостью к радиочастотным интерференционным помехам (EMI) позволяют эффективно решать целый ряд проблем современных сверхширокополосных систем в составе телекоммуникационных и радиолокационных комплексов, включая построение высокоскоростных волоконно-оптических и беспроводных систем связи, активных фазированных антенных решеток (АФАР) большой апертуры, фильтрацию СВЧ сигналов, построение малозумящих оптоэлектронных СВЧ генераторов и др.

Ключевым элементом компонентной базы систем радиофотоники является оптический СВЧ модулятор, осуществляющий наложение СВЧ радиосигнала на оптическую несущую от одночастотного высококогерентного лазера. Данное устройство представляет собой сложную систему, обеспечивающую наиболее эффективное взаимодействие оптического излучения и радиочастотного сигнала. Использование интегральной оптики (оптических и СВЧ волноводов) обеспечивает высокую концентрацию энергии оптического излучения и радиосигнала при большой длине взаимодействия, что позволяет существенно снизить необходимую для модуляции мощность радиосигнала. В работе исследуется конфигурация электродов бегущей волны в виде копланарной линии на Х-срезе кристаллической подложки ниобата (Рис. 1) [1]. Геометрические параметры конфигурации электродов выбираются исходя из двух основных требований [2]: минимальное рассогласование скоростей СВЧ и оптических волн, минимальные погонные потери СВЧ волны при распространении по электродам. Дополнительно для снижения управляющего напряжения минимизировалась толщина буферного диэлектрического слоя.

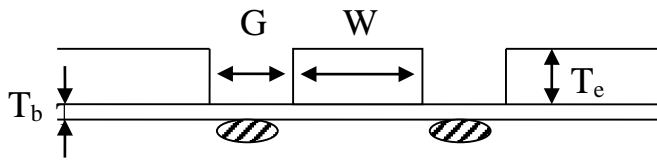


Рис. 1. Поперечное сечение электродов бегущей волны, выполненных в виде копланарной линии.  $T_e$  – толщина токоведущих частей,  $T_b$  – толщина диэлектрического буферного слоя,  $W$  – ширина горячего электрода,  $G$  – межэлектродный зазор.

В анализируемой геометрии ширина центрального (горячего электрода) и межэлектродный зазор были фиксированными параметрами ( $W=13$  мкм,  $G=14$  мкм), которые в процессе изготовления однозначно задаются топологией фотолитографической маски. Данные значения были выбраны исходя из требований оптической схемы, а также технологических ограничений: воспроизводимости пропечатывания фотолитографической маски, устойчивости к смещениям и перекосам при совмещении, возможности создания толстых покрытий. Толщина буферного слоя и токоведущих (металлических) частей электродов были выбраны в качестве варьируемых параметров для управления характеристиками электродов, что позволяет оптимизировать структуру электродов без изменения их топологии.

Для частот порядка десятка ГГц поперечные размеры СВЧ структуры составляют величину, много меньшую длины волны. Следовательно, для описания поведения таких структур может быть использована теория длинных линий. Теоретический анализ распространения модулирующей СВЧ волны внутри модулятора основывался на модели линии, погонные характеристики которой рассчитывались методом конечных элементов с использованием квази-ТЕМ приближения. Таким образом, волновое сопротивление и эффективный показатель преломления могут быть найдены численно путём расчёта погонной ёмкости электродов ( $C$ ), а так же погонной ёмкости аналогичных электродов, расположенных в вакууме ( $C_0$ ).

$$N_m = \sqrt{\frac{C}{C_0}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{Rc\sqrt{CC_0}}{2} \quad (2)$$

$$Z_0 = \frac{1}{c\sqrt{CC_0}} \quad (3)$$

Отметим, что коэффициент затухания  $\alpha$  зависит от частоты, поскольку вследствие скин-эффекта от частоты зависит погонное активное сопротивление  $R$ . Как будет показано далее, потери, вызванные затуханием СВЧ волны во время прохождения через СВЧ электроды модулятора, являются одним из факторов, ограничивающих его рабочую полосу.

Частотная характеристика электрооптического отклика модулятора бегущей волны, при одновременном учёте рассогласования и потерь в проводниках будет определяться выражением [3]

$$H(f) = \sqrt{\frac{1 - 2e^{-\alpha(f)L} \cos(\xi(f)L) + e^{-2\alpha(f)L}}{(\alpha(f)L)^2 + (\xi(f)L)^2}} \quad (4)$$

где  $\alpha(f) = \alpha_c \sqrt{f}$  - потери в проводнике, связанные с конечной проводимостью электродов и наличием скин-эффекта,  $\xi(f) = 2\pi f |N_m - n| / c$  - коэффициент рассогласования СВЧ и оптической волн.  $\alpha_c$  - нормированная на корень из частоты величина потерь в проводниках.  $L$  - длина области взаимодействия модулируемой и модулирующей волн. Результаты анализа представлены на Рис. 2 и Рис. 3 в виде семейства зависимостей эффективного показателя преломления ( $N$ ) и рабочей полосы ( $F$ ) модулятора ( $L=30$  мм) от толщины диэлектрического буферного слоя ( $T_b$ ) при различной толщине электродов ( $T_e$ )

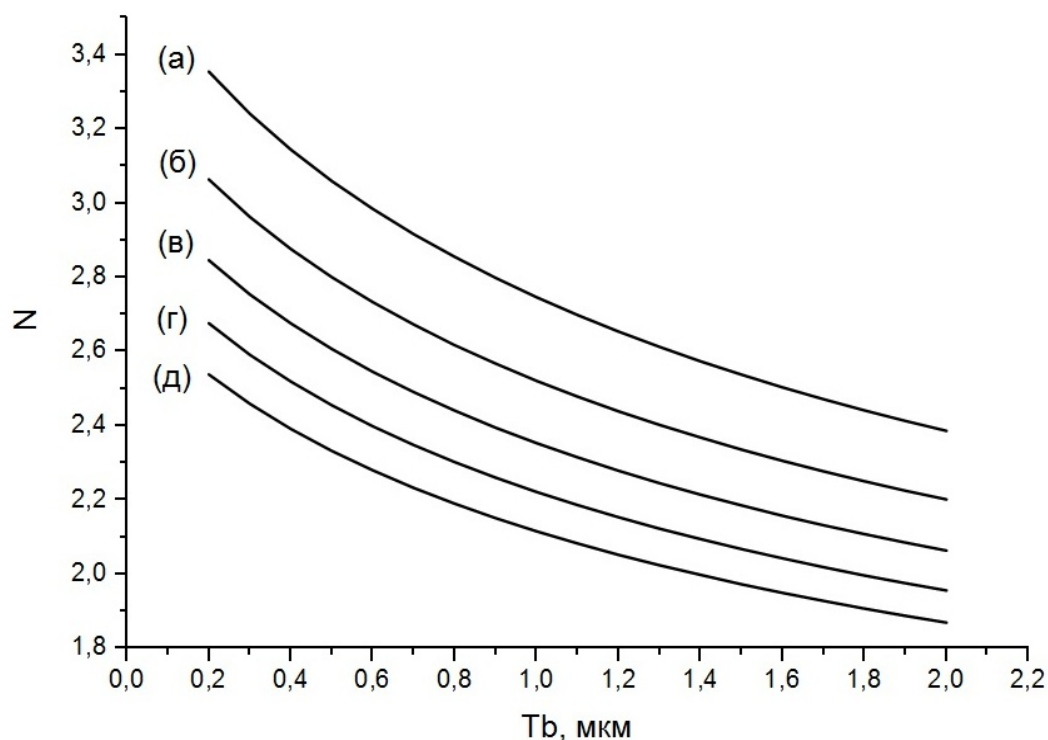


Рис. 2. Результаты теоретического анализа конфигурации СВЧ электродов: зависимости рабочей полосы частот модулятора, для разной толщины токоведущих частей  $T_e$ : (а) – 5 мкм, (б) – 10 мкм, (в) – 15 мкм, (г) – 20 мкм, (д) – 25 мкм.

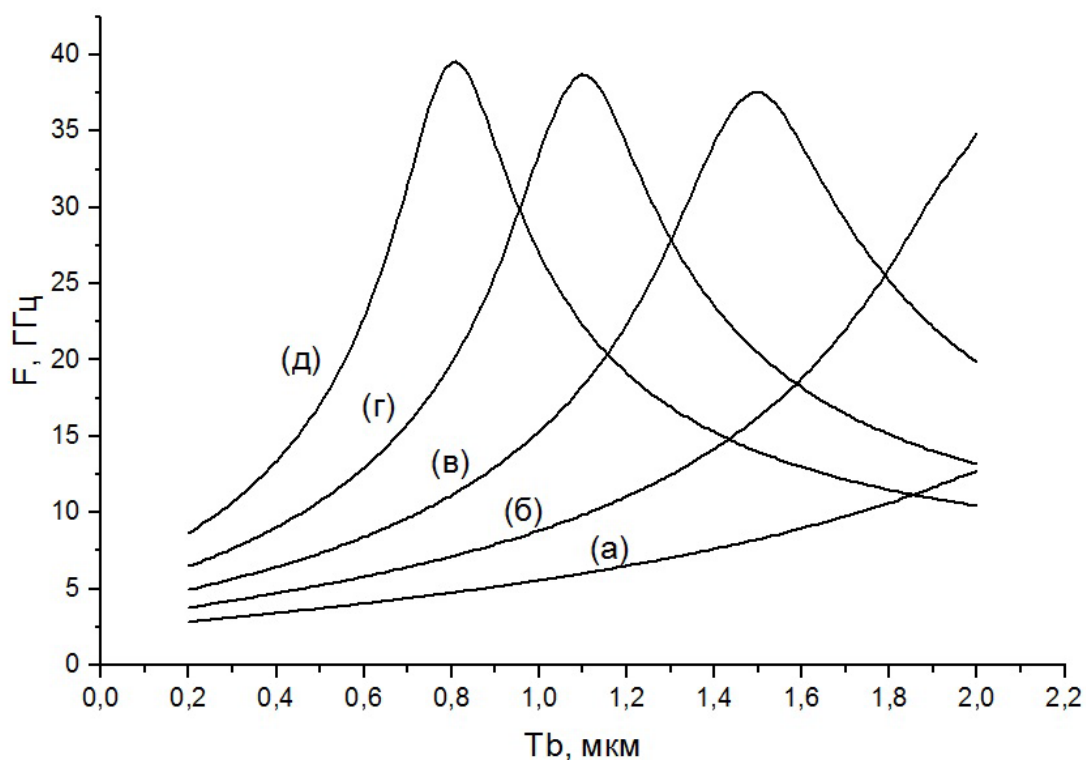


Рис. 3. Результаты теоретического анализа конфигурации СВЧ электродов: зависимости рабочей полосы частот модулятора, для разной толщины токоведущих частей  $T_e$ : (а) – 5 мкм, (б) – 10 мкм, (в) – 15 мкм, (г) – 20 мкм, (д) – 25 мкм.

Зависимости полосы частот имеют ярко выраженный максимум, который соответствует условию согласования фазовых скоростей бегущей модулирующей СВЧ волны и распространяющегося по оптическим волноводам света, когда эффективный показатель преломления копланарной линии в СВЧ диапазоне становится равным групповому показателю преломления оптической волны ( $\lambda = 1550$  нм,  $n_g = 2.19$ ). В то время как полуволновое напряжение практически не зависит от толщины токоведущих частей и монотонно снижается при уменьшении толщины буферного слоя. Выбор оптимальных значений  $T_e$  и  $T_b$  в нашем случае был ограничен технологическими возможностями формирования толстых металлических слоев. Предельная толщина горячего электрода составляла  $T_e = 20$  мкм. Формирование более толстых слоев затруднено проблемами формирования толстых литографических масок высокого разрешения и ухудшением адгезии из-за механических напряжений в толстых металлических пленках. При данной толщине токоведущих частей оптимальное согласование скоростей происходит при толщине буферного слоя  $T_b = 1,1$  мкм. Оценка полуволнового напряжения для данной толщины буферного слоя при длине электродов  $L = 30$  мм дает величину порядка  $U_{\pi} \approx 5,5$  В.

В случае идеального согласования скоростей, полоса частот модулятора будет определяться ростом потерь в проводниках с увеличением частоты, приводящим к снижению эффективной длины модулятора и оказывается пропорциональна удельной электропроводности материала электродов  $B_{\alpha} \sim \sigma$ . В связи с этим, весьма перспективным в качестве альтернативы золоту для изготовления токоведущих частей электродов выглядит серебро [4], имеющее в 1.4 раза более высокую проводимость ( $\sigma_{Ag} = 62,5 \cdot 10^6$  S/m,  $\sigma_{Au} = 45,5 \cdot 10^6$  S/m) и хорошо зарекомендовавшее себя как проводящий материал в СВЧ электронике. При разработке модуляторов с полосой частот 20 GHz и более выбор

материала имеющего более высокую удельную проводимость может существенно упростить требования к согласованию скоростей, следовательно понизить требования к точности соблюдения геометрических параметров проводников и как следствие упростить технологию изготовления и повысить выход годных изделий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.604.21.0055, RFMEFI60414X0055)

#### Библиографический список

1. Chen A., Murphy E. J.. Broadband optical modulators : science, technology, and applications. USA, Boca Raton, CRC Press, 2012. 532 P.
2. Noguchi K., Mitomi O., Miyazawa H. // J. Lightwave Technol. 1998. V. 16. P. 615.
3. Ghione G., Goano M., Madonna G., Omegna G., Pirola M., Bosso S., Frassati D., Perasso A. // Microwave Theory Tech. 1999. V. 47. P. 2287 – 2293
4. Лебедев В.В., Ильичев И.В., Агрозов П.М., Шамрай А.В. // 2014, Письма ЖТФ, т.40, 17 страницы: 39-46.