

09;15

Влияние материала токоведущих частей электродов на характеристики интегрально-оптических СВЧ-модуляторов

© В.В. Лебедев, И.В. Ильичев, П.М. Агрузов, А.В. Шамрай

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

E-mail: vladimir_l@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 января 2014 г.

Показано, что удельная электропроводность материала существенным образом влияет на частотную полосу электрооптического модулятора. При оптимальном согласовании скоростей оптического излучения и модулирующей СВЧ-волны частотная зависимость электрооптического отклика определяется потерями в электродах за счет скин-эффекта. В данных условиях переход с традиционного золота на серебро, имеющее более высокую удельную электропроводность, позволяет в 1.4 раза увеличить частотную полосу модулятора.

Интегральные электрооптические модуляторы бегущей волны на основе ниобата лития являются наиболее широко распространенным типом внешних оптических СВЧ-модуляторов [1]. Целый ряд работ был посвящен оптимизации конфигурации электродов, например [2–6]. Исследования были сосредоточены на изучении влияния геометрии структуры, в то время как материалы для изготовления электродов использовались одни и те же: оксид кремния (SiO_2) для диэлектрического буферного слоя и гальваническое золото для токоведущих частей.

Золото как материал токоведущих частей имеет целый ряд достоинств — это хорошо отработанная технология гальванического осаждения [7], высокие СВЧ-характеристики [8], стойкость к внешним условиям. Однако предпочтительное использование золота во многом сложилось из развития технологии СВЧ-модуляторов, и детального поиска оптимального материала не проводилось.

Цель данной работы — провести теоретические и экспериментальные исследования влияния материала токоведущих частей электродов на характеристики интегрально-оптических СВЧ-модуляторов, выявить условия, при которых возможно разделить влияние геометрии и свойств материалов, а также определить области параметров электродов, при

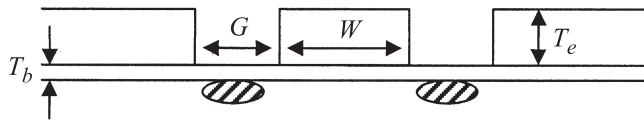


Рис. 1. Поперечное сечение электродов бегущей волны, выполненных в виде копланарной линии. T_e — толщина токоведущих частей, T_b — толщина диэлектрического буферного слоя, W — ширина горячего электрода, G — межэлектродный зазор.

которых наибольшее влияние оказывают характеристики материала токоведущих частей.

Исследуется стандартная конфигурация электродов бегущей волны в виде копланарной линии на X-срезе кристаллической подложки ниобата (рис. 1) [3]. Геометрические параметры конфигурации электродов выбираются исходя из 2 основных требований [9]: 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.

Согласование скоростей было реализовано за счет увеличения толщины токоведущих частей электродов, что приводит к увеличению доли электрического поля в воздушном зазоре с низкой диэлектрической постоянной $\varepsilon = 1$ и позволяет скомпенсировать разницу в величине диэлектрической постоянной ниобата лития в СВЧ-области ($\varepsilon_z = 34$, $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 43$) [10] и на оптических частотах ($\varepsilon_0 = n_e^2 = 4.6$).

Погонные потери СВЧ-волны также во многом зависят от толщины электродов. В длинной линии со слабыми потерями волна затухает по экспоненциальному закону

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_0 e^{-\alpha(f)x}, \quad (1)$$

где $\alpha(f)$ — коэффициент затухания, частотная зависимость которого на частотах порядка десятков СГц хорошо описывается выражением $\alpha(f) = \alpha_c \sqrt{f} + \alpha_d f$. Первое слагаемое отвечает за потери в токоведущих (проводящих) частях при толщине скин-слоя значительно меньше геометрических размеров центрального полоска (горячего электрода) копланарной линии; второе слагаемое — за потери в диэлектриках,

вкладом которых на частотах до 10 GHz можно пренебречь, при использовании ниобата лития в качестве подложки и SiO₂ как диэлектрического буферного слоя [3].

Общая частотная характеристика электрооптического отклика модулятора бегущей волны при одновременном учете явлений рассогласования скоростей и потерь СВЧ-волны выражается формулой [3]

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

где $\xi(f)$ — коэффициент рассогласования скоростей СВЧ- и оптической волн, описываемый выражением $\xi(f) = (2\pi f |N_m - n|)/c$, N_m — эффективный показатель преломления СВЧ-волны в структуре, n — показатель преломления оптической волны в оптическом волноводе модулятора, c — скорость света в вакууме. Как видно из (2), полоса пропускания в равной степени сильно зависит как от потерь в проводниках α_c , так и от разности показателей преломления $|N_m - n|$. Когда рассогласование скоростей отсутствует, а потерями в диэлектрике можно пренебречь, полоса пропускания по уровню 3 dB будет определяться ростом потерь в проводниках с увеличением частоты, приводящим к снижению эффективной длины модулятора:

$$B_\alpha = \left(\frac{6.84}{\alpha_{c dB} L} \right)^2, \quad (3)$$

где $\alpha_{c dB} = 20 \alpha_c \lg(\exp) \approx 8.69 \alpha_c [dB/(\sqrt{\text{GHz}} \cdot \text{cm})]$ — коэффициент потерь, выраженный в децибелах, который на высоких частотах обратно пропорционален корню из удельной электропроводности материала электродов. Таким образом, полоса пропускания в отсутствие рассогласования 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, имеющее в 1.4 раза более высокую проводимость ($\sigma_{Ag} = 62.5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$, $\sigma_{Au} = 45.5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$) и хорошо зарекомендовавшее себя как проводящий материал в СВЧ-электронике [8].

В работе был проведен расчет теоретических характеристик модулятора с электродами в виде копланарной линии, изображенной на рис. 1. Была исследована зависимость полосы частот модулятора от

геометрических размеров компонентов линии (T_e , T_b , W и G), а также от удельной электропроводности материала токоведущих частей (σ). В выражении (2) для АЧХ модулятора фигурируют 2 неизвестные величины — потери в СВЧ-структуре ($\alpha(f)$) и параметр рассогласования скоростей оптической и СВЧ-волн ($\xi(f)$). Эффективный показатель преломления для СВЧ-волны вычисляется с использованием выражения $N_m = \sqrt{C/C_0}$, где C — погонная емкость электродов структуры, C_0 — погонная емкость электродов той же формы в вакууме. Волновое сопротивление электродов находим из выражения $Z_0 = 1/(c\sqrt{CC_0})$. Тогда коэффициент потерь в электродах равен

$$\alpha(f) = \frac{R(f)}{2Z_0}, \quad (4)$$

где $R(f)$ — погонное сопротивление электродов, зависящее от частоты вследствие скин-эффекта. На основе результатов численных расчетов погонной емкости и погонного сопротивления электродов были построены теоретическая частотная зависимость коэффициента потерь и электрооптического отклика модулятора (2).

Технические и технологические возможности ограничивали максимальную толщину изготавливаемых токоведущих частей (не более $5 \mu\text{m}$). Для данной толщины был проведен анализ оптимальных геометрических параметров электродов с точки зрения максимального расширения полосы частот, в результате которого были выбраны следующие параметры: $G = 13 \mu\text{m}$, $W = 14 \mu\text{m}$, $T_b = 1.2 \mu\text{m}$, $T_e = 5 \mu\text{m}$. Рассчитанные для данной конфигурации теоретические характеристики копланарной линии составили: $N_m = 2.79$, $Z_0 = 40.9 \Omega\text{m}$, $\alpha_{cdB} = 0.47 \text{ dB}/(\text{GHz}^{0.5} \cdot \text{cm})$. Общая длина копланарных электродов 32 mm . Длина, на которой происходит взаимодействие СВЧ- и оптического излучения, 28 mm . С рассчитанными оптимальными геометрическими параметрами был изготовлен опытный образец интегрально-оптического модулятора.

На изготовленном образце с использованием векторного анализатора цепей были проведены прямые измерения потерь и задержки СВЧ-волны в электродах. Потери измерялись как амплитуда параметра матрицы рассеяния S_{12} . Для измерения групповой задержки использовались измерения фазового сдвига параметра S_{11} . Сначала копланарные электроды закорачивались на входе и измерялось время групповой задержки отраженного сигнала в измерительном тракте.

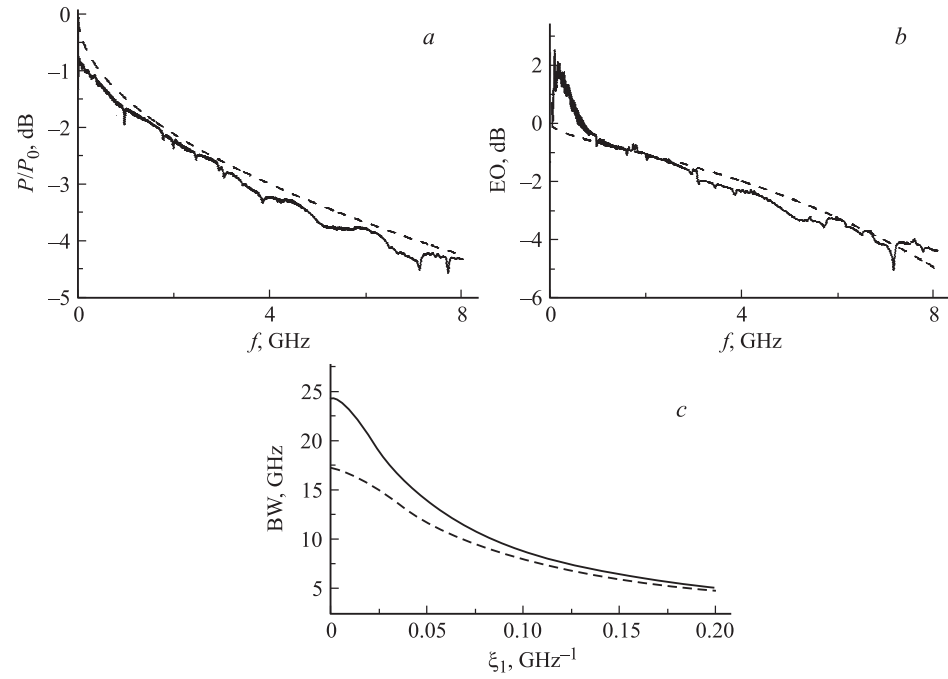


Рис. 2. *a* — зависимость потерь в электродах от частоты СВЧ-сигнала. *b* — частотная зависимость электрооптического отклика. Сплошная линия — результаты измерений, пунктирная кривая — результаты теоретических расчетов (*a, b*). *c* — зависимость рабочей полосы модулятора по уровню — 3 dB от параметра рассогласования скоростей. Сплошная линия — серебряные электроды ($\alpha_1 = 0.075 \text{ GHz}^{-0.5}$), пунктирная линия — золотые электроды ($\alpha_1 = 0.089 \text{ GHz}^{-0.5}$).

Для определения времени задержки в электродах задержка в измерительном тракте вычиталась из результатов измерения общей задержки при закороченном выходе СВЧ-электродов. На рис. 2, *a* представлены экспериментальная зависимость потерь в электродах от частоты, а также теоретическая кривая потерь от частоты с учетом влияния скин-эффекта. Как можно видеть, теоретическая кривая находится в хорошем согласии с экспериментальными данными в диапазоне частот от 2 до 8 GHz. Измеренная задержка СВЧ-волны при отражении от короткого замыкания и двукратном прохождении электродов составила $\tau = 0.60 \pm 0.01$ ns. Из результатов измерений был определен эффективный показатель преломления на радиочастотах

$$N_m = \frac{c\tau}{2L}, \quad (5)$$

где τ — задержка, L — длина электродов структуры. Определенный из экспериментальных данных эффективный показатель преломления при длине электродов 32 mm был равен $N_m = 2.80 \pm 0.05$, что хорошо согласуется с рассчитанным на основании геометрических и материальных параметров структуры значением теоретической оценки $N_m = 2.79$.

Экспериментальная частотная зависимость электрооптического отклика модулятора и теоретическая зависимость, построенная для численно рассчитанных характеристик СВЧ-электродов, также хорошо ложатся одна на другую (рис. 2, *b*), что подтверждает сделанные ранее выводы. Выражение (2) для частотной характеристики электрооптического отклика модулятора в случае пренебрежения потерями в материале диэлектрика можно представить в виде

$$H(f) = e^{-\alpha_1 \sqrt{f}} \sqrt{\frac{\text{sh}^2(\alpha_1 \sqrt{f}) + \sin^2(\xi_1 f)}{(\alpha_1 \sqrt{f})^2 + (\xi_1 f)^2}}, \quad (6)$$

где $\alpha_1 = \alpha_0 L/2$ — параметр, отвечающий за потери, а $\xi_1 = (\pi L |N_m - n|)/c$ — параметр, отвечающий за рассогласование. Для рассматриваемых геометрических параметров электродов $\alpha_1 = 0.075 \text{ GHz}^{-0.5}$, $\xi_1 = 0.18 \text{ GHz}^{-1}$. При данных значениях, соответствующих значительному рассогласованию скоростей, рабочая полоса частот слабо зависит от материала электродов. Однако, как показывает зависимость на рис. 2, *c*, по мере улучшения согласования влияние материалов токоведущих частей электродов становится все заметнее. Было

проведено сопоставление зависимости для серебряных токоведущих частей с удельной электропроводностью, определенной в данной работе, и зависимости для аналогичных электродов, выполненных из золота, рассчитанной на основе литературных данных ($\alpha_1 = 0.089 \text{ GHz}^{-0.5}$). 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.

Таким образом, проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния материала токоведущих частей электродов на характеристики интегрально-оптических СВЧ-модуляторов. Показано, что удельная электропроводность материала существенным образом влияет на частотную полосу электрооптического модулятора. Переход с традиционного золота на серебро, имеющее более высокую удельную проводимость, для изготовления токоведущих частей электродов при оптимальном согласовании скоростей позволяет в 1.4 раза увеличить частотную полосу модулятора. Был изготовлен опытный образец интегрально-оптического СВЧ-модулятора с электродами бегущей волны в виде копланарной линии с токоведущими частями, выполненными из гальванического серебра. Исследование характеристик электродов показало соответствие разработанной теоретической модели полученным экспериментальным данным.

Список литературы

- [1] *Chen A., Murphy E.J.* Broadband optical modulators: science, technology, and applications. USA, Boca Raton, CRC Press, 2012. 532 p.
- [2] *Rahman B.M., Haxha S.* // J. Lightwave Technol. 2002. V. 20. P. 1856–1863.
- [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] *Anwar N., Obayya S.S.A., Haxha S., Themistos C., Rahman B.M.A., Grattan K.T.V.* // J. Lightwave Technol. 2002. V. 20. P. 826–833.
- [5] *Madabhushi R.* // Optical Fiber Communication Conference. San Jose, California, 1996. Technical Digest Series. V. 2. P. ThB3.
- [6] *Kondo J., Kondo A., Aoki K., Imaeda M., Mori T., Mizuno Y., Takatsuji S., Kozuka Y., Mitomi O., Minakata M.* // J. Lightwave Technol. 2002. V. 20. P. 2110–2114.

- [7] *Schlesinger M., Paunovic M.* Modern Electroplating. 5th ed. USA, Hoboken, Wiley, 2010. 736 p.
- [8] Radio Frequency Performance of Electroplated Finishes // Proc. I.R.E.E. Australia, 1970. V. 31. P. 148–164.
- [9] *Noguchi K., Mitomi O., Miyazawa H.* // J. Lightwave Technol. 1998. V. 16. P. 615.
- [10] *Wong K.K.* Properties of lithium niobat. UK, London: The Institution of Electrical Engineers, 2002. 422 p.