

**Платонов Р.А.<sup>1,2</sup>, Алтынников А.Г.<sup>1,2</sup>, Михайлов А.К.<sup>1,3</sup>,  
Ястребов А.В.<sup>1</sup>, Медведева В.М.<sup>1</sup>, Трофимов П.М.<sup>1</sup>,  
Козырев А.Б.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>Дагестанский государственный университет народного хозяйства

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

## **Перестраиваемые цепи согласования СВЧ импеданса лазера с прямой модуляцией**

*Предложена методика расчета перестраиваемых цепей для согласования СВЧ импеданса лазеров с прямой модуляцией, широко применяемых в системах радиофотоники. Представлены результаты численного моделирования согласующих цепей на частотах ~10 ГГц на основе трех типов перестраиваемых элементов: полупроводниковые, сегнетоэлектрические и микроэлектромеханические конденсаторы. Приводится оценка перестройки полосы согласования в зависимости от значения коэффициента управляемости емкости.*

**Ключевые слова:** Радиофотоника, перестраиваемые согласующие цепи, лазер с прямой модуляцией.

Объединение технологий связи по оптическому волокну и СВЧ связи привело к созданию новой междисциплинарной области – радиофотоники. Использование оптоволоконной техники для генерации, распространения и обработки СВЧ сигналов обладает следующими преимуществами: низкие вносимые потери, широкая полоса рабочих частот, улучшение характеристик электромагнитной совместимости и помехозащищённости. В общем случае, радиофотонный приемо-передающий модуль (РППМ), наряду с усилением обеспечивает модуляцию/демодуляцию оптического излучения СВЧ сигналом. Лазеры с прямой модуляцией (ЛПМ) являются весьма перспективной основой для создания РППМ на их основе, в особенности для систем цифровой передачи данных, ввиду их относительно низкой стоимости (по сравнению с внешними модуляторами) и возможностью интеграции в гибридных интегральных схемах.

Наиболее широко распространенными ЛПМ являются вертикально-излучающие лазеры (VCSEL) и лазеры с распределенной обратной связью (DFB). В целом VCSEL характеризуются меньшей стоимостью и меньшим диапазоном рабочих частот по сравнению с DFB лазерами [1]. Оптический диапазон вблизи 1550 нм характеризуется наименьшими потерями и малой дисперсией оптоволоконных линий, при этом большинство лазеров DFB работают именно в этом диапазоне. Предельные частоты модуляции таких лазеров достигают ~20 ГГц.

Стоит отметить, что эффективность электрооптического преобразования зависит не только от характеристик ЛПМ, но также определяется уровнем согласования импеданса лазера с СВЧ линией передачи (обычно 50 Ом). К примеру, согласование импедансов по уровню КСВН ~ 1.9, соответствует потерям мощности ~10% на отражение от нагрузки обратно в источник/генератор СВЧ сигнала. Таким образом, характеристики цепи

согласования влияют на эффективность, динамический диапазон и рабочий диапазон частот РППМ на основе ЛПМ [2].

В общем случае для ЛПМ характерны низкие значения вещественной части входного импеданса ( $R_{Lin} = \text{Re}(Z_{Lin}) = 5-10 \text{ Ом}$ ), поэтому многие производители DFB лазеров используют резистивное согласование с помощью тонкопленочных резисторов ( $R_m$ ) интегрированных в корпус лазера. Резистор, включенный в схему последовательно лазеру, обеспечивает общее входное сопротивление ( $R_m + R_{Lin}$ ) близкое к 50 Ом, что обеспечивает сверхширокополосное согласование вплоть до предельных частот модуляции лазера. Основным минусом подобного согласования является тот факт, что согласующий резистор рассеивает значительную часть СВЧ мощности, что снижает эффективность РППМ на основе ЛПМ. Чтобы избежать этого, можно использовать согласующие цепи на реактивных элементах. Данный подход позволяет существенно улучшить коэффициент передачи ( $|S_{21}|$ ) согласующей цепи, однако ведет к уменьшению относительной полосы согласования, нежели в случае использования резистивных согласующих элементов.

Расчет реактивной согласующей цепи основан на теории синтеза СВЧ фильтров. В качестве прототипа согласующей цепи рассчитывается секционный трансформатор, состоящий из К/Ј инверторов. К/Ј инвертор является идеальным четырехполюсником, изменяющим фазу проходящей волны на величину  $\pm 90$  градусов в заданной полосе частот, и характеризуется входным сопротивлением К (или проводимостью Ј) не зависящим от сопротивления нагрузки. Использование К/Ј инверторов позволяет рассчитать параметры идеализированной согласующей цепи, при этом достаточно большое количество схемотехнических решений К/Ј инверторов позволяет создать удовлетворяющие требованиям согласующие цепи. Простейшими реализациями инверторов являются четвертьволновой отрезок линии передачи или Т/П - образные цепи на сосредоточенных элементах. Другие возможные реализации на отрезках линий передачи приведены в [3]. Применение данной методики для расчета согласующих цепей на основе сосредоточенных не перестраиваемых элементах рассмотрено в работе [4].

Использование электрически управляемых (или перестраиваемых) реактивных элементов позволит увеличить эффективную ширину полосы согласования ( $\Delta f_{op}$ ) без увеличения порядка согласующей цепи ЛПМ, за счет частотного сканирования мгновенной полосы согласования ( $\Delta f_i$ ). Это позволит обеспечить минимальное отражение в узкой мгновенной полосе, что увеличит отношение сигнал/шум системы. Высокая частотная селективность согласующей цепи с возможностью перестройки также может выполнять функцию предварительной фильтрации сигнала, частотного сканирования при детектировании резонансных целей, адаптивной перестройки рабочего диапазона частот.

В качестве перестраиваемых/переключаемых СВЧ реактивных элементов могут выступать такие устройства как: полупроводниковые [5] и сегнетоэлектрические [6] варакторы, микромеханические (МЭМ) конденсаторы [7]. Полупроводниковые и сегнетоэлектрические варакторы характеризуются временем переключения  $\sim 1-10 \text{ нс}$ , время переключения МЭМ элементов  $\sim 1-10 \text{ мкс}$ . К основным параметрам перестраиваемых элементов относят коэффициент перестройки ( $k = C_{max}/C_{min}$ ) и добротность ( $Q$ ). Полупроводниковые варакторы сочетают в себе высокое быстродействие, высокий коэффициент перестройки ( $k=6-8$ ), низкие управляющие напряжения (порядка 10 В), и добротность порядка 100 на частоте 1 ГГц. Однако, низкий уровень управляющих напряжений ограничивает уровень мощности СВЧ сигнала (снижает динамический диапазон системы), также наблюдается рост уровня диссипативных потерь СВЧ мощности с частотой ( $Q \approx 20$  при 10 ГГц), что ограничивает широкое применение полупроводниковых варакторов на рабочих частотах до нескольких ГГц.

Для расчета перестраиваемых реактивных согласующих цепей, целесообразно использовать подход, основанный на расчете связанных резонаторов, аналогичный

используемому для проектирования СВЧ полосовых фильтров. В качестве элементов связи между резонаторами используются J-инверторы.

На рисунке 1а представлена схема реактивной согласующей цепи на связанных резонаторах. Нагрузка (ЛПМ) представлена в качестве параллельно включенных сосредоточенных резистора ( $R_L$ ) и конденсатора ( $C_L$ ), такое упрощение эквивалентных схем корректно при узких полосах согласования [8]. Индуктивность  $L_m$  вместе с  $R_L C_L$  формирует параллельный резонансный контур с частотой резонанса  $f_0 = (2\pi\sqrt{L_m C_L})^{-1}$ . При этом второй параллельный резонансный контур состоит из  $L_m C_m$  элементов, при условии  $C_m = C_L$  резонансные частоты совпадают (при невозможности практической реализации  $C_m = C_L$ , необходимо рассчитать номиналы элементов исходя из условий резонансной частоты  $f_0$  и параметра крутизны контура  $L_m C_L$ ). Как уже отмечалось ранее, в качестве J-инвертора проводимости может быть использована П-образная схема, представленная на рисунке 1а.  $R_G$  – можно рассматривать как внутреннее сопротивление генератора СВЧ сигнала или волновое сопротивление линии передачи согласованной с генератором (50 Ом).

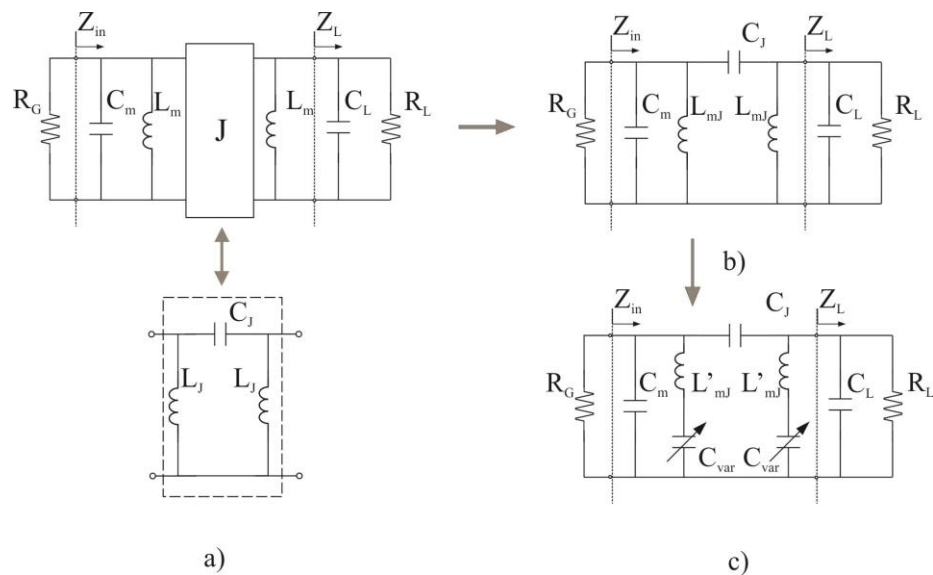


Рис. 1. Перестраиваемая согласующая цепь на связанных резонаторах.

Как уже отмечалось выше, в качестве перестраиваемых реактивных СВЧ элементов используются варакторы, следовательно, для внесения в схему управляемого элемента, необходимо преобразовать схему к виду, указанному на рисунке 1в. Индуктивный элемент  $L_{mj}$  заменяется последовательным соединением элементов  $L'_{mj}$  и  $C_{VAR}$ , где  $C_{VAR}$  – управляемая емкость варактора. Значения  $L'_{mj}$  и  $C_{VAR}$  определяются из условий равенства полных реактивных сопротивлений на частоте  $f_0$ :

$$X_{L_{mj}} = X_{C_{VAR}} + X_{L'_{mj}} \quad (1)$$

И условия резонанса цепи  $L'_{mj} C_{VAR}$  на частоте  $f_{LC}$ :

$$|X_{C_{VAR}}| = |X_{L'_{mj}}| \quad (2)$$

где  $f_{LC} \left( \leq \frac{2}{3} f_0 \right)$  – частота резонанса цепи  $L'_{mj} C_{VAR}$ .

Итоговая перестраиваемая согласующая цепь представлена на рисунке 1в. Перестройку центральной частоты согласования можно оценить по формуле:

$$\frac{f_0}{f'_{0}} = \sqrt{\frac{C_m + C_{VAR}}{C_m k + C_{VAR}}} \quad (3)$$

На рисунках 2а-б представлен результат моделирования частотной характеристики, рассчитанной перестраиваемой согласующей цепи с центральной частотой согласования  $\sim 10$  ГГц, и необходимым уровнем согласования по модулю коэффициента отражения от нагрузки - не хуже, чем (-15) дБ. В качестве нагрузки использовался VCSEL лазер с входным сопротивлением  $\sim (2.7-j20)$  Ом, на частоте 10 ГГц. Рассчитанные номиналы элементов, входящих в согласующую цепь:  $C_m \approx 1$  пФ;  $C_f \approx 0.3$  пФ;  $C_{VAR} \approx 4.2$  пФ;  $L'_{mf} \approx 0.4$  нГн. На рисунке 2а показана перестройка полосы согласования при управляемости варактора  $k=6$ , и при добротности  $\sim 50$ . Добротность неуправляемых реактивных элементов  $\sim 100$ . На рисунке 2б представлено влияние добротности управляемого элемента на потери, вносимые согласующей цепью в полосу согласования при центральной мгновенной полосе.

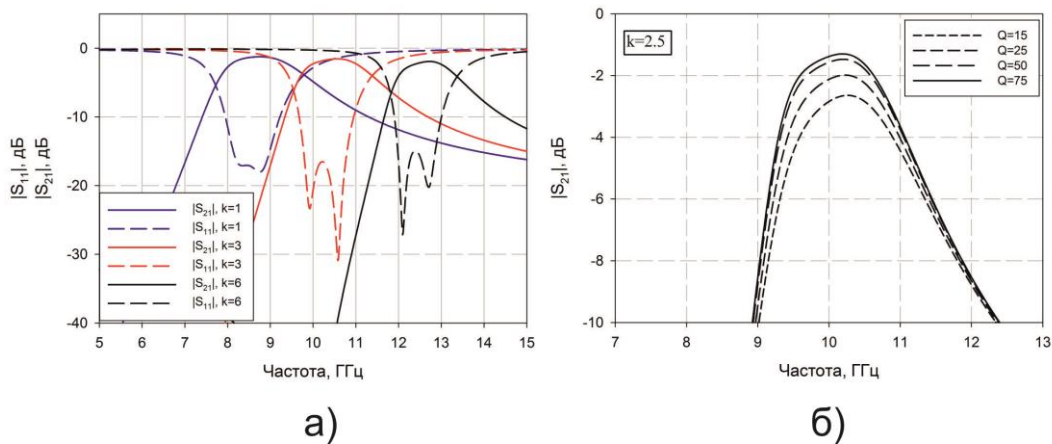


Рис. 2. Коэффициент отражения и передачи перестраиваемой реактивной согласующей цепи в зависимости от  $k$  – а); влияние добротности управляемого элемента на вносимые потери в полосе согласования – б).

Результаты моделирования показывают, увеличение эффективной полосы согласования по уровню отражения не хуже (-15 дБ) до 5 ГГц, что в 2,5 раза больше чем мгновенная полоса цепи без перестройки [4]. При этом вносимые потери в полосе согласования составляют порядка (-1.7) дБ при добротности управляемых элементов  $Q=50$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», соглашение № 14.608.21.0002 от 27.10.2015 (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60815X0002).

#### Библиографический список

1. Gamage, P. A. Performance Comparison of Directly Modulated VCSEL and DFB Lasers in Wired-Wireless Networks / P.A. Gamage [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2018. - Vol.20, № 24. - P. 2102-2104.
2. Chtioui, M. Analog microwave photonic link based on a high power directly modulated laser, a high power photodiode and passive impedance matching / M. Chtioui [et al.] // 2012 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics. – Noordwijk. – 2012. – P. 269-272.
3. Маттей, Г.Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Том 1 / Г. Л. Маттей, Л. Янг, Е.М.Т Джонс. - М.: Связь, 1972. — 443 с.
4. Платонов Р.А., Алтынников А.Г., Михайлов А.К., Ястребов А.В., Козырев А.Б. Согласование СВЧ входного импеданса лазера с прямой модуляцией Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 30.05-02.06 2016, Санкт-Петербург С. 295-298.

5. Infineon Technologies AG. BB833 Data sheet. Germany, Infineon Technologies AG. – 2009.
6. Subramanyam, G. Linearity and temperature dependence of large-area processed high-q barium strontium titanate thin-film varactors / G. Subramanyam [et al.] // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2010. - Vol. 57, № 7. – P. 1692–1695.
7. Grichener, A High-Q RF MEMS capacitor with digital/analog tuning capabilities /A. Grichener., B. Lakshminarayanan, G. M. Rebeiz // 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 2008. P. 1283–1286.
8. Brendel, F., Millimeter-Wave Radio-over-Fiber Links based on Mode-Locked Laser Diodes / F. Brendel. – Karlsruhe, Germany: KIT Scientific Publishing, 2013. – 322 p.