

**Платонов Р.А.^{1,2}, Алтынников А.Г.^{1,2}, Михайлов А.К.^{1,3},
Ястребов А.В.¹, Козырев А.Б.^{1,2}.**

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

²Дагестанский государственный университет народного хозяйства

³Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

Согласование СВЧ входного импеданса лазера с прямой модуляцией

Рассмотрены согласующие СВЧ цепи лазера с прямой модуляцией на основе реактивных и резистивных элементов. Приводятся результаты расчёта коэффициента отражения и эффективности модуляции для обоих вариантов согласующих цепей. Показано, что реактивная согласующая цепь обеспечивает необходимый уровень коэффициента отражения в полосе частот 30% и обеспечивает увеличение эффективности модуляции на ~10 дБ в сравнении с резистивной согласующей цепью.

Ключевые слова: Радиофотоника, СВЧ модуляция лазерного излучения.

Объединение технологий связи по оптическому волокну и беспроводной 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 приёмо-передающий модуль (РППМ), наряду с усилением обеспечивает модуляцию/демодуляцию оптического излучения СВЧ сигналом, при этом средой распространения оптического излучения является оптическое волокно или свободное пространство. РППМ является базовой платформой для создания различных радиофотонных систем обработки сигналов и, в частности, систем радиолокации [1,2].

Модуляция оптического сигнала с помощью внешнего электрооптического модулятора позволяет работать на частотах вплоть до 100 ГГц, однако в относительно низкочастотном диапазоне (~10÷20) ГГц целесообразно использовать лазеры с прямой модуляцией интенсивности, ввиду относительной простоты реализации РППМ на их основе. Для эффективной модуляции оптической несущей необходимо обеспечить согласование лазера с СВЧ трактом, с целью максимальной передачи СВЧ мощности в область генерации излучения. Поэтому под эффективностью модуляции (η) мы будем понимать отношение СВЧ мощности, поступающей в гетероструктуру лазерного диода к мощности генератора СВЧ. Способы согласования можно разделить на резистивные и реактивные, по характеру импеданса электрических элементов, используемых для согласования. Сложность обеспечения эффективного широкополосного согласования определяется низким значением частотно зависимой активной части импеданса лазера ($\text{Re}(Z_{in})$) ~ от единиц до десятка Ом и наличием реактивной составляющей. Существует ряд

работ, демонстрирующих способы СВЧ согласования лазера в широкой полосе частот [3,4] на основе параметров эквивалентной схемы лазера. С точки зрения увеличения частотной полосы согласования и простоты реализации резистивные цепи являются наиболее распространенными, но неизбежно ведут к уменьшению эффективности модуляции за счет диссипации СВЧ мощности в цепях согласования. Необходимо отметить, что для ряда применений РППМ не требуют широкополосного согласования, а эффективность модуляции является более критичным параметром. В данной работе на примере VSCSEL лазера [5] с прямой модуляцией приводится сравнение эффективности модуляции при резистивном широкополосном и сравнительно узкополосном (30%) реактивном согласовании.

Параметры эквивалентной схемы VSCSEL лазера без цепей согласования определяются из СВЧ малосигнальных S - параметров цепи, измеренных при различных токах смещения, путем аппроксимации измеренных частотных зависимостей подбором приемлемых величин параметров схемы. На рисунке 1 представлена типичная частотная зависимость компонент импеданса лазера [3].

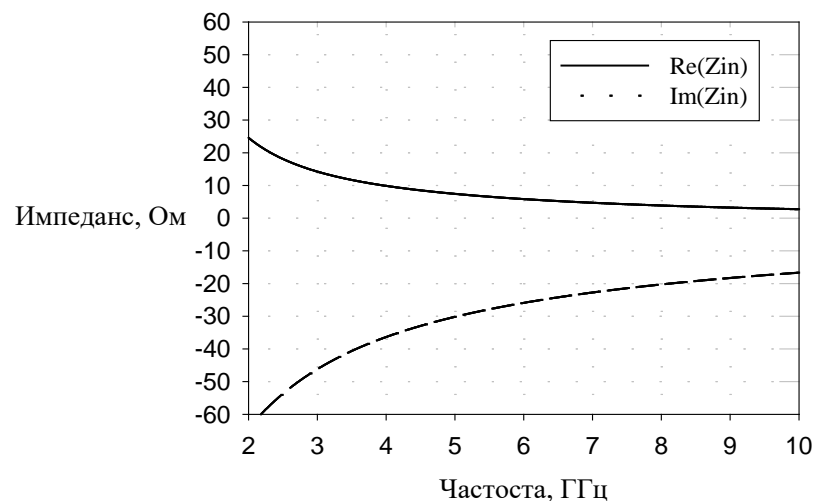


Рис. 1. Частотная зависимость входного импеданса VSCSEL лазера без согласующих цепей.

Расчет реактивной согласующей цепи основан на теории расчета и синтеза фильтров. В качестве прототипа согласующей цепи рассчитывается секционный трансформатор, состоящий из К/Ј инверторов (рисунок 2а). К/Ј инвертор является идеальным четырехполюсником, изменяющим фазу проходящей волны на величину ± 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 реализаций К/Ј инверторов позволяет реализовать удовлетворяющие требованиям реальные 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 [6]. На рисунке 2а показана схема трансформатора-прототипа, обеспечивающего согласование генератора (50 Ом) с нагрузкой резистивного характера 5 Ом, соответствующей $Re(Z_{in})$ входного импеданса VSCSEL на частоте ~ 7 ГГц (рис.1). Прототип рассчитан с Т – образными инверторами на согласование в полосе частот $\sim 30\%$ с центральной частотой 7 ГГц.

Для согласования реактивной составляющей входного импеданса лазера можно использовать L-образные реактивные цепи, при этом номиналы реактивных элементов могут быть рассчитаны таким образом, чтобы соответствовать входному сопротивлению одной из секций трансформатора-прототипа на центральной частоте (см. Рис. 2б с L-образной цепью). Данный подход позволяет уменьшить количество элементов согласующей цепи без значительного влияния на частотную полосу согласования. На рисунке 2в представлена резистивная цепь согласования в сочетании с L-образной цепью, при сопротивлении резистора $R=41\ \text{Ом}$.

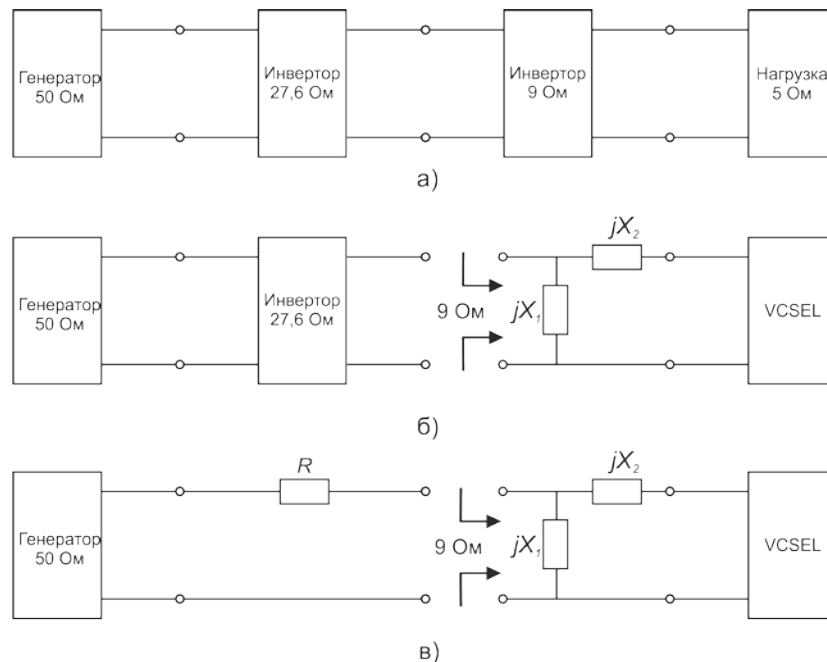


Рис. 2. Трансформатор-прототип на основе К инверторов – (а), согласующая цепь на основе реактивных элементов – (б), резистивная согласующая цепь – (в).

На рисунке 3а приведены результаты расчета реактивного согласования при оптимальных номиналах сосредоточенных элементов L- и T-образных цепей, для сравнения приводится коэффициент отражения резистивной цепи с номиналом резистора 41 Ом в сочетании с L-образной цепью. Полученные номиналы элементов приведены в таблице 1. Сравнение эффективности модуляции VCSEL лазера с реактивной и резистивной согласующими цепями приводится на рисунке 3б.

Таблица 1.

	Номинал	Добротность
L-образная цепь	0,29 нГн	50
	0,33 нГн	
T-образная цепь, инвертор (LCL)	0,63 нГн	
	0,82 пФ	

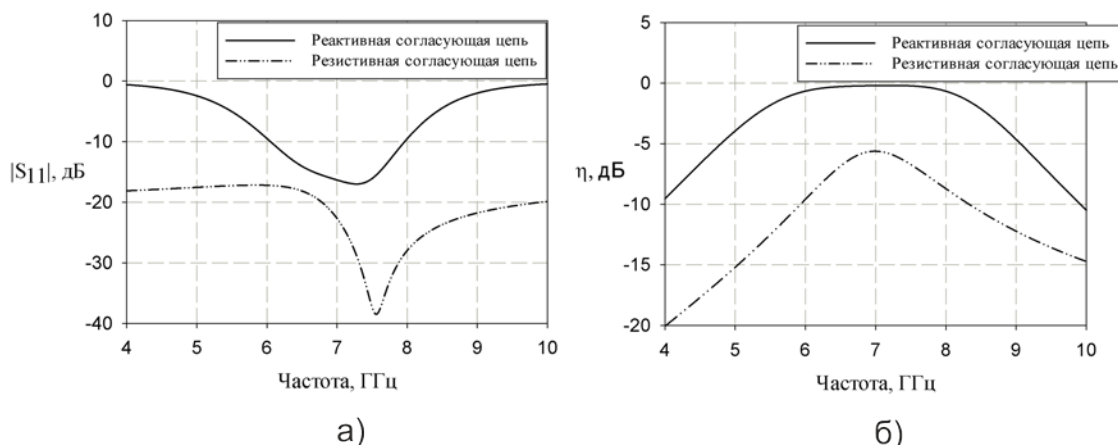


Рис. 3. Коэффициент отражения (S_{11}) – (а) и эффективность модуляции – (б) реактивной и резистивной цепи согласования.

Результаты моделирования показывают, что реактивная согласующая цепь по сравнению с резистивной позволяет существенно повысить эффективность модуляции (на ~10 дБ) в относительно широкой полосе частот (~30% при центральной частоте 7 ГГц) приемлемой для ряда радиолокационных и коммуникационных систем радиофотоники.

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. Microwave Photonic Signal Processing / J. Capmany [et al.] // Journal of Lightwave Technology. – 2013. - Vol. 31, №4. - P. 571-586.
2. High-Gain, Low-Noise-Figure, and High-Linearity Analog Photonic Link Based on a High-Performance Photodetector / X. Xie, [et al.] // Journal of Lightwave Technology. – 2014. – Vol. 32, №21. - P. 3585-3590.
3. Analog modulation properties of oxide confined VCSELs at microwave frequencies / C. Carlsson [etal.] // Journal of Lightwave Technology. – 2002. - Vol. 20, № 9. - P. 1740-1749.
4. Impedance Characteristics and Parasitic Speed Limitations of High-Speed 850-nm VCSELs / Y. Ou [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2009. - Vol. 21, № 24. - P. 1840-1842.
5. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices / H.E. Li, K. Iga (ed.). – Berlin: Springer, 2003. – 386 p.
6. 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.