

## АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К АКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ ВАРАКТОРНЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

*А.В. Рубаник, С.И. Ковалев, Г.П. Турук*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, БГУИР, 220013, Минск, Беларусь, тел. +375 17 2938427  
E-mail: [rubanik@bsuir.by](mailto:rubanik@bsuir.by)*

The analysis of requirements for electronic components for designing of very high frequency generators for medical and biophysical research is presented. We consider the varactor frequency multiplier as the most efficient decision in designing of powerful millimeter and submillimeter frequency sources. The simulation of varactor tripler work using Microwave Office tools shows that efficiency of frequency multiplier strongly depends on parasitic parameters of varactor, mainly inductance and case capacity. As the result of simulation we estimated the acceptable level of varactor's parasitic parameters for millimeter frequency multipliers.

В последнее время исследования применения электромагнитных волн (ЭМВ) в биологии и медицине охватывают область все более высоких частот. Так, получены новые результаты при исследованиях воздействия на живые организмы ЭМВ КВЧ диапазона на частотах 150 ГГц и выше [1, 2]. Соответственно все более востребованной становится аппаратура для генерирования ЭМВ КВЧ диапазона. Совершенно очевидно, что продвижение в область более высоких частот делает экспериментальную аппаратуру все более технологически сложной и дорогой. В настоящем докладе проведен анализ доступной элементной базы для создания аппаратуры генерации частот КВЧ диапазона, проведено моделирование схемотехнических решений по созданию умножителей частоты КВЧ диапазона, определены требования к активным компонентам умножителей частоты.

Если исключить из рассмотрения дорогостоящие источники излучения на основе вакуумных приборов (магнетронов, клистронов, ЛОВ, ЛБВ и др.), то в верхней части миллиметрового диапазона длин (100-300 ГГц) оказывается немного твердотельных активных компонентов, на основе которых могут быть созданы источники излучения. Это:

- автогенераторы и умножители частоты на лавиннопролетных диодах (ЛПД);
- генераторы на диодах Ганна, работающие на второй гармонике;
- умножители частоты на планарных GaAs диодах Шоттки;
- варакторные умножители частоты, выполняемые, как правило, на GaAs варакторах с переходом на гетероструктурах (Heterostructure Barrier Varactor – HBV).

Касательно источников ЭМВ на ЛПД следует отметить их технологическую сложность и дороговизну. Как правило, они представляют собой умножители частоты высокой кратности на ЛПД с накачкой в сантиметровом диапазоне. Технологией создания мощных ЛПД для работы в субмиллиметровом диапазоне в мире владеют ограниченное число производителей, монополизм в данной сфере объясняет высокие цены на данную продукцию. Несмотря на высокий уровень генерируемой мощности в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн (типичные значения мощности 10 мВт на 150 ГГц, 5 мВт на 300 ГГц), из-за высокой стоимости источники сигнала на ЛПД в аппаратуре гражданского назначения широкого применения не получили.

Частотный диапазон генераторов на диодах Ганна ограничивается частотой около 150 ГГц при генерируемой мощности не более 2 мВт. Этот вид генераторов технологически наиболее прост, однако указанный диапазон частот и выходных мощностей ограничивает применение диодов Ганна в данной области.

В настоящее время получены очень хорошие результаты при проектировании умножителей частоты на планарных GaAs диодах Шоттки. Например, имеется сообщение о достижении мощности 90 мВт на частоте 80 ГГц на основе диодного удвоителя частоты

[3]. Схема данного удвоителя построена на базе диодов Шоттки, выращенных на специальной GaAs мембране. Подобные разработки используют уникальные технологии создания трехмерных GaAs структур, что ограничивает их применение в широкой практике.

Варакторные умножители частоты имеют большие, чем диоды Шоттки, рабочие напряжения (15-30 В) и значительно большие рабочие токи. Рабочий ток диода в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн может достигать сотен миллиампер. Это позволяет рассматривать варакторный умножитель частоты как наиболее перспективное решение для создания мощных источников сигнала субмиллиметрового диапазона длин волн.

На основе моделирования варакторного умножителя частоты в среде “Microwave office” определим требования к элементной базе такого источника сигнала.

На рис. 1 приведена использовавшаяся при моделировании типовая эквивалентная схема варакторного умножителя (утроителя) частоты. В схеме использована SPICE-модель диода. При моделировании в нижней части миллиметрового диапазона были заданы параметры диода, близкие к параметрам отечественного варакторного GaAs диода 3А617 с плавным переходом ( $\gamma=0,3$ ) в металлокерамическом корпусе, который широко применяется в технике миллиметрового диапазона. При моделировании в верхней части миллиметрового диапазона были заданы параметры диода, близкие к параметрам GaAs умножительного варакторного диода MA46H146 с резким переходом ( $\gamma=0,5$ ) в пластмассовом чип-корпусе.

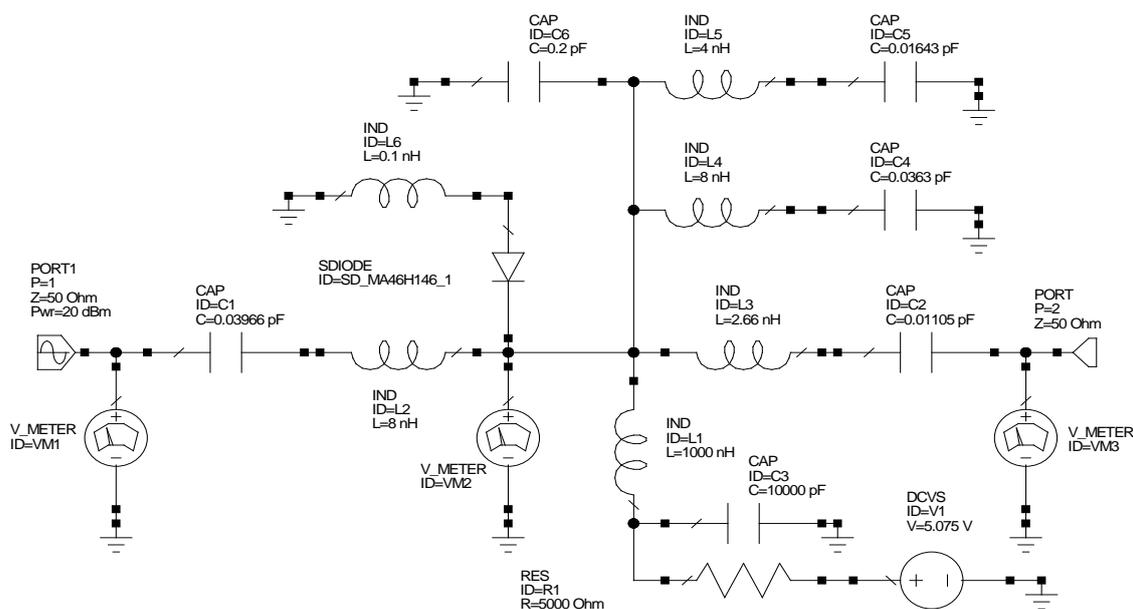


Рис. 1. Эквивалентная схема варакторного утроителя частоты.

Эквивалентная схема включала в себя:

- собственно варактор с цепью смещения и реактивностями, моделирующими паразитные параметры корпуса. Активное сопротивление варактора, емкость при нулевом смещении и вольт-фарадная характеристика задавались параметрами SPICE-модели диода;

- входную и выходную фильтрующе-согласующие цепи на базе последовательных LC контуров, настроенные на первую и третью гармоники входного сигнала соответственно;

– холостые контура, включенные в колебательный контур варактора и настроенные на первую и вторую гармоники входного сигнала.

Мощность источника входного сигнала (накачки) была установлена 20 дБм и не изменялась при моделировании. Моделирование утроителя производилось на входных частотах 10, 20, 30, 40, 50 ГГц при выходных частотах соответственно 30, 60, 90, 120, 150 ГГц. Настройка умножителя производилась подбором оптимального смещения на варакторе и настройкой холостых контуров. Согласование умножителя с активными сопротивлениями источника сигнала и нагрузки производилось как расстройкой входного и выходного контуров относительно резонансных частот, так и поиском оптимальных сопротивлений входного и выходного порта. При моделировании контролировалось напряжение на диоде с целью поддержания его в пределах, не превышающих максимально допустимое напряжение диода. Также смещение на диоде выбиралось из условия недопущения режима частичного отпираания диода, поскольку режим работы диода с накоплением объемного заряда требует существенного уточнения SPICE-модели диода с учетом дополнительных данных, известных производителям диодов.

Моделирование показало, что при использовании в модели умножителя частоты SPICE-параметров диода 3A617 на выходной частоте 30 ГГц могут быть получены потери преобразования 4-5 дБ, а на выходной частоте 60 ГГц могут быть получены потери преобразования 2,8-3,3 дБ. На выходных частотах 90-150 ГГц потери преобразования утроителя частоты на диоде 3A617 резко падали до 10 дБ и менее. Это было результатом того, что диод работал на частоте выше частоты собственного резонанса, при этом из-за увеличения падения переменного напряжения на паразитной индуктивности диода уменьшалась амплитуда переменного напряжения на “рабочей” емкостной составляющей эквивалентной схемы диода. В некоторых пределах проблема решалась увеличением коэффициента трансформации входной согласующей цепи. При этом сужалась рабочая полоса частот и недопустимо увеличивалась амплитуда сигнала на диоде. Практически значимое увеличение к.п.д. умножителя могло быть достигнуто только уменьшением паразитных параметров диода, т.е. его заменой на другой диод.

На втором этапе моделирования в модели умножителя частоты использовались SPICE-параметры GaAs варакторного диода MA46H146 с резким переходом ( $\gamma=0,5$ ) в пластмассовом чип-корпусе. Моделирование показало, что для диода MA46H146 на выходных частотах 90-120 ГГц могут быть получены потери преобразования 3-4 дБ, а на выходной частоте 150 ГГц могут быть получены потери преобразования 4,5-6,5 дБ.

Таким образом, моделирование схемы варакторного умножителя частоты показало, что его потери преобразования сильно зависят от паразитных параметров диода. Показано, что в варакторных умножителях частоты верхней части миллиметрового диапазона необходимо использовать варакторы с паразитной индуктивностью диода менее 0,05 нГн и конструктивной емкостью менее 0,05 пФ. При этом на частотах 90-150 ГГц достижимы потери преобразования утроителя частоты 3-4,5 дБ.

#### *Литература*

1. Ю.В. Гуляев, А.П. Креницкий, О.В. Бецкий, А.В. Майбородин, В.Ф. Киричук. Терагерцевая техника и ее применение в биомедицинских технологиях.-Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. - М., Радиотехника -2008 г., №9, с. 8-16.
2. P.H. Siegel, Terahertz technology in biology and medicine, IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques, Vol. 52, No 4, pp.2438-2447, Oct. 2004.
3. D.W. Porterfield, T.W. Crowe, R.F. Bradley, N.R. Erickson, A high-power, fixed-tuned, millimeter-wave balanced frequency doubler, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 4, pp. 419-425, April 1999.