

Моделирование работы умножителя напряжения для RFID-меток в диапазоне 900 МГц – 10 ГГц

В.И. Зубков, А.В. Лебедев

ООО «НМ-Тех»

Аннотация: выполнено моделирование работы умножителя напряжения на натуральных (native) NМОП-транзисторах для RFID-меток в диапазоне 900 МГц – 10 ГГц. Показано, что при использовании модели высоковольтного натурального транзистора с минимальной длиной канала 500 нм эффективность работы умножителя в диапазоне частот 900 МГц – 2.4 ГГц сопоставима с эффективностью работы умножителя на частоте 900 МГц. С увеличением частоты от 2.4 ГГц до 10 ГГц работоспособность умножителя сохранялась, но эффективность его работы быстро снижалась вследствие быстрого уменьшения добротности входной цепи. Показана возможность повышения рабочих частот умножителей напряжения на натуральных МОП-транзисторах с уменьшением их минимальной длины их канала.

Ключевые слова: RFID, energy harvesting, native transistor

1. Введение

В последние годы ведутся интенсивные работы по повышению частот работы и по миниатюризации RFID-меток, например, [1, 2]. При прочих равных условиях максимальное расстояние взаимодействия между меткой и опрашивающим устройством с повышением рабочей частоты уменьшается [2], однако работа на высоких частотах позволяет уменьшить размеры антенны и, соответственно, размеры метки [2], определять местоположение метки [3], повысить скорость обмена данными.

Важным блоком пассивных (без встроенного источника энергии) RFID-меток является умножитель напряжения [4, 5]. Умножители напряжения преобразуют принимаемое антенной электромагнитное излучение в постоянный ток. От эффективности работы умножителя зависит работоспособность метки и максимальное расстояние от опрашивающего устройства до метки. Обычно умножители напряжения для RFID-меток изготавливаются на диодах с барьерами Шоттки с небольшой высотой барьера [3] или на МОП-транзисторах с пониженным [5], в том числе с почти нулевым пороговым напряжением [6] в диодном включении. Однако изготовление диодов Шоттки с заданной высотой барьера на линиях по производству стандартных интегральных схем (ИС) может потребовать нескольких дополнительных технологических операций. Транзисторы с почти нулевым пороговым напряжением в зарубежной технической литературе называются native transistors [6], что, по-видимому, можно перевести как натуральные транзисторы. Технология изготовления натуральных МОП-транзисторов – достаточно простая, обычно требуется один дополнительный фотошаблон [6]. В одной из библиотек схемотехнических элементов ООО «НМ-Тех» имеется модель протестированного высоковольтного натурального NМОП-транзистора. Поэтому было предложено провести моделирование умножителя напряжения на натуральных МОП-транзисторах для перспективных RFID-меток, работающих в диапазоне частот 1 – 10 ГГц.

2. Моделирование работы умножителя напряжения для RFID-меток в диапазоне 900 МГц –10 ГГц

Минимальные размеры натуральных транзисторов обычно несколько больше минимальных размеров стандартных транзисторов [6]. Минимальная длина канала высоковольтного транзистора, соответствующего имеющейся модели, составила 500 нм. Ширина канала транзисторов для моделируемого умножителя напряжения была подобрана таким образом, чтобы активное входное сопротивление 6-каскадного умножителя напряжения составляло 1.5 кОм, что равно активному входному сопротивлению кристалла широко известной RFID-метки Higgs-3 [7]. Входная емкость моделируемого умножителя составила примерно 0.72 пФ, что близко к типичной величине входной емкости кристалла указанной метки, составляющей 0.85 пФ [7]. При переходе от параллельного импеданса к последовательному (рассчитывается по хорошо известным формулам) величина активного входного сопротивления преобразуется в величину примерно 45.8 Ом. В реальных RFID-метках антенна имеет некоторый выходной импеданс, который обычно представляют последовательно включенными резистором и индуктивностью [4]. Для достижения высокой эффективности работы умножителя напряжения антенну и кристалл RFID-метки проектируют таким образом, чтобы выходной импеданс антенны был согласован с входным импедансом кристалла. При этом входная цепь образует колебательный контур с некоторой [4], обычно небольшой вследствие наличия значительного активного сопротивления добротностью. Антенна метки моделировалась как генератор переменного напряжения с последовательно включенными резистором, равным активному входному сопротивлению моделируемой схемы при последовательном импедансе, т. е. 45.8 Ом, и согласованной с входной емкостью указанной схемы индуктивностью, компенсирующей указанную входную емкость. На частоте 900 МГц согласование импеданса антенны с входным импедансом моделируемой схемы достигается примерно при индуктивности 47 нГн.

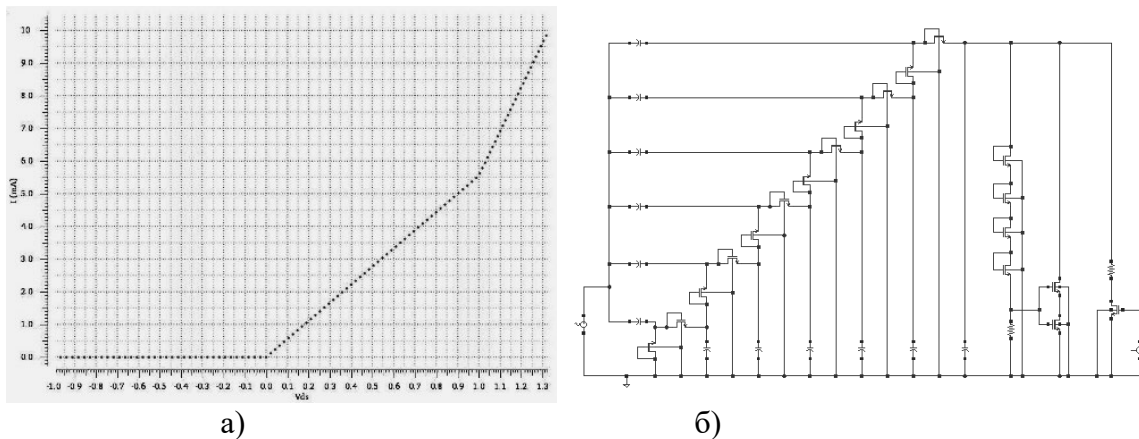


Рисунок 1. Вольтамперная характеристика натурального МОП-транзистора в диодном включении (а) и принципиальная схема умножителя (б).

На рисунке 1 а) приведена вольтамперная характеристика натурального МОП-транзистора, соответствующего используемой модели, в диодном включении (затвор соединен со стоком) при напряжении на подложке -1 В, на рисунке 1 б) – принципиальная схема умножителя со вспомогательными схемами. Принципиальная схема умножителя аналогична принципиальной схеме умножителя, приведенной в [5], но содержит 6 каскадов. Моделируемая схема также содержит разрядную цепь для защиты от высокого напряжения, аналогичную соответствующему устройству в [5], подключаемый нагрузочный резистор, генератор синусоидального сигнала и

генератор импульсов, подключающий нагрузочный резистор. Величина нагрузочного резистора составляла 50 кОм, т. е. при напряжении на выходе выпрямителя, несколько превышающем 1.2 В, обеспечивался ток потребления, превышающий 20 мкА, достаточный для многих применений.

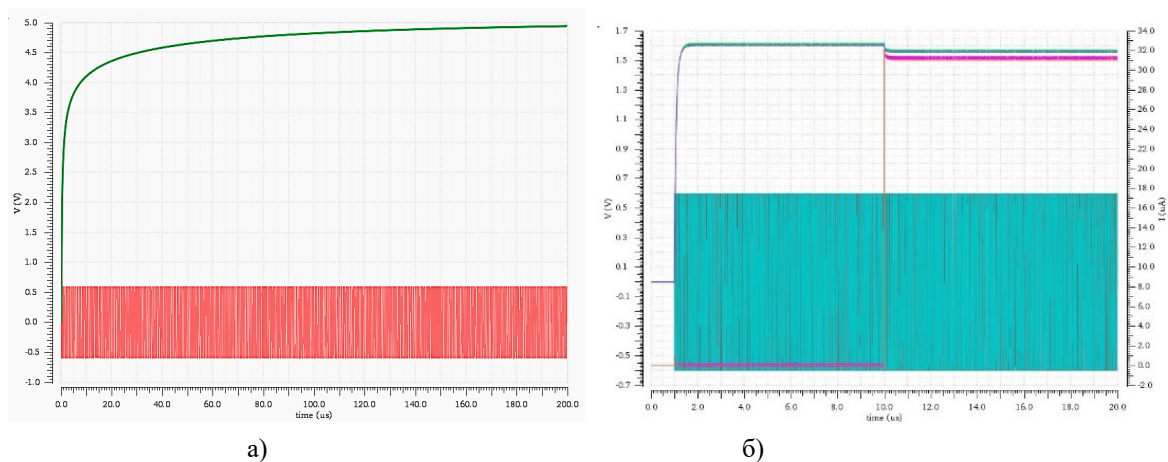
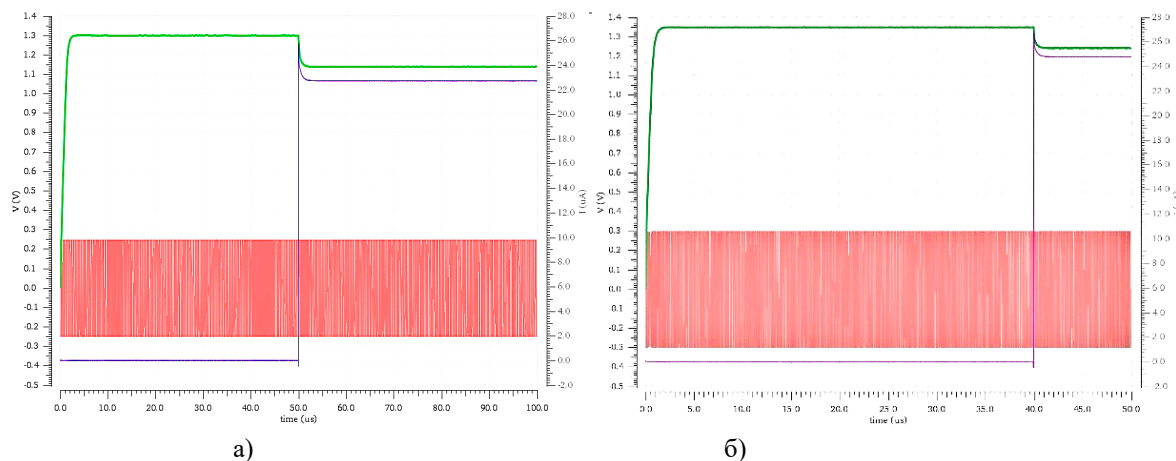


Рисунок 2. Работа умножителя напряжения при нулевом выходном сопротивлении генератора без устройства защиты от высокого напряжения и без нагрузочного резистора на частоте 900 МГц (а) и с защитой от высокого напряжения и подключаемым нагрузочным резистором величиной 50 кОм на частотах 900 МГц и 100 ГГц (б).

Рисунки 2 (а), (б) и 3 (а) – (г) иллюстрируют работы умножителя. На рисунке 2 (а) показаны высокочастотное напряжение на входе и напряжение на выходе умножителя. На рисунках 2 (б) и 3 (а) – (г) дополнительно показан ток в подключаемом нагрузочном резисторе. Рисунок 2 (а) показывает, что умножители напряжения с натуральными транзисторами могут формировать значительные напряжения, которые могут привести к пробое микросхемы. Поэтому далее приводятся результаты моделирования с подключенной схемой защиты от высокого напряжения. Из рисунка 2 (б) следует, что при нулевом выходном сопротивлении генератора умножитель напряжения практически одинаково работает на частотах 900 МГц и 100 ГГц. Хорошая работа умножителя напряжения на столь высокой частоте объясняется отсутствием перезаряжаемых конденсаторов значительной емкости при работе в стационарном режиме: в начале работы умножитель напряжения может относительно медленно заряжать накапливающие выпрямленный ток конденсаторы, но в установившемся режиме умножитель напряжения только немного их подзаряжает.



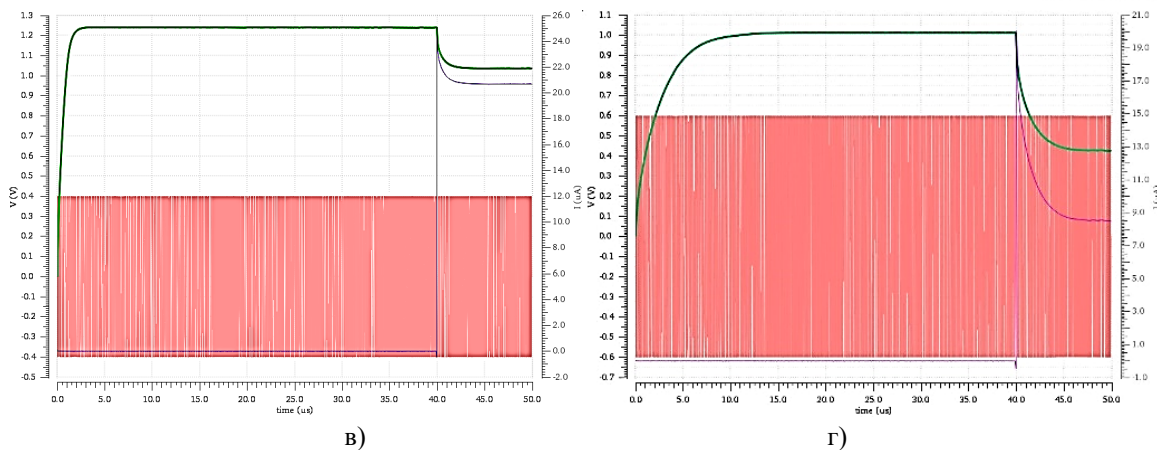


Рисунок 3. Результаты моделирования работы умножителя напряжения с устройством защиты и подключаемым нагрузочным резистором при выходном импедансе антенны, согласованном с входным импедансом кристалла, на частотах входного сигнала 900 МГц (а), 2.4 ГГц (б), 5.8 ГГц (в) и 10 ГГц (г).

На рисунках 3 (а) – (г) приведены результаты моделирования работы умножителя при согласованном выходном импедансе антенны с входным импедансом моделируемого умножителя напряжения на частотах входного сигнала 900 МГц (а), 2.4 ГГц (б), 5.8 ГГц (в) и 10 ГГц (г). Согласование импеданса антенны с входным импедансом умножителя при увеличении частоты достигалось в результате уменьшения индуктивности. Из рисунков видно, что эффективность работы умножителя, определяемая в данном случае как отношение выходного постоянного напряжения к входному переменному, на частоте 2.4 ГГц незначительно меньше значения указанного параметра на частоте 900 МГц, что объясняется небольшим уменьшением добротности входной цепи, определяемой величиной активного сопротивления входного колебательного контура и отношением согласующей индуктивности к входной емкости. При дальнейшем повышении рабочей частоты добротность входной цепи быстро уменьшалась, и, соответственно, быстро уменьшалась эффективность работы умножителя, однако его работоспособность сохранялась, что указывает на возможность его оптимизации для работы на высоких частотах в результате уменьшения длины затворов и, соответственно, уменьшения площади и емкости затворов используемых транзисторов, т. к. уменьшение емкости затворов позволяет увеличить добротность входной цепи.

3. Заключение

Технологический уровень некоторых отечественных предприятий, в том числе ООО «НМ-Тех» позволяет производить пассивные RFID-метки, работающие на частотах примерно до 10 ГГц, что в свою очередь позволяет уменьшить характерный размер антенн примерно до 10 – 15 мм.

Список литературы

1. H. Desa, M. Sofian, S. Zairi. Study of Integration 2.4GHz and 5.8GHz // Proceedings of the International Conference on Man-Machine Systems (ICoMMS) 11 – 13 October 2009, Batu Ferringhi, Penang, MALAYSIA – C. 5A6-1 URL: https://www.researchgate.net/publication/277069219_Study_of_integration_24GHz_and_58GHz_in_RF_ID_tag (дата обращения 18 04 2022).
2. P. Nikitin, J. Ensworth, K. V. S. Rao, et all. 2.4 GHz Passive Gen2 RFID System 2019 IEEE International Conference on RFID (RFID) URL: https://people.ece.uw.edu/nikitin_pavel/papers/RFID_2019.pdf (дата обращения 18 04 2022).

3. D. Dardari, N. Decarli, D. Fabbri, et al. An Ultra-wideband Battery-less Positioning System for Space Applications. URL: <https://arxiv.org/pdf/2001.00504.pdf> (дата обращения 18 04 2022).
4. Jong-Wook Lee, Nham Tran. Characterization of Schottky Diodes and Design of Voltage Multiplier for UHF-band Passive RFID Transponder // Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea SD Volume 44 Issue 7 Serial No. 361 / Pages.9-15 / 2007 / 1229-6368(pISSN) Abstract. URL: <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200734513381784.page> (дата обращения 18 04 2022). PDF. URL: <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200734513381784.pdf> (дата обращения 18 04 2022).
5. Wang Yao ,WenGuangjun,MaoWei,HeYanli et all Design of a passive UHF RFID tag for the ISO18000-6C protocol // Journal of Semiconductors Vol. 32,No. 5 May2011 – С. 055009-1 https://www.researchgate.net/publication/231145630_Design_of_a_passive_UHF_RFID_tag_for_the_ISO18000-6C_protocol (дата обращения 18 04 2022).
6. Native transistor. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Native_transistor (дата обращения 18 04 2022).
7. Higgs™ URL:<http://www.alientechnology.com/wp-content/uploads/Alien-Technology-Higgs-3-ALC-360.pdf> (дата обращения 18 04 2022).