

Гибридная технология формирования затворов мощных РНЕМТ

С.Д. Зинкин, Д.А. Лаврентьев, А.И. Ращенко

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: в материале рассматривается метод использования гибридной технологии изготовления Т-образного затвора мощных РНЕМТ. Традиционные методы формирования затвора с использованием электронной литографии являются очень длительными. Поэтому был разработан технологический процесс формирования Т-образного затвора, в котором используется только одна операция электронной литографии, для формирования основания («ножки») Т-образного затвора, а для формирования канала и «шляпы» затвора обычная фотолитография i-line диапазона ($\lambda = 365$ нм). В зарубежной литературе подобная технология формирования затворов получил название гибридной (hybrid technology), а метод литографии – mix and match lithography.

В ходе разработки технологического процесса канал и «шляпа» затвора формировались с использованием установки проекционной литографии. Была достигнута точность совмещения слоев $3\sigma = \pm 0,06$ мкм. Формирование «ножки» затвора проводилось с помощью установки электронной литографии.

Были получены необходимые линейные размеры затвора, что соответствует размерам, получаемым с помощью метода электронной литографии. НЧ- и СВЧ-параметры мощного транзистора, измеренные по тестовым модулям параметрического контроля (PCM), также лежат в рекомендуемом интервале. При этом стоит отметить, что длительность процесса формирования затвора по гибридной технологии в 2,5 раза быстрее, чем стандартная технология с использованием электронной литографии. Таким образом, показана возможность сокращения времени формирования канально-затворной части мощного транзистора без ухудшения его параметров.

Ключевые слова: гибридная технология, РНЕМТ транзисторы, затворы мощных транзисторов.

1. Введение

При изготовлении высокопроизводительного полевого транзистора A_3B_5 критическим этапом является формирование Т-образного затвора. Традиционные методы формирования затвора с использованием электронной литографии являются очень длительными. Поэтому был разработан технологический процесс формирования Т-образного затвора, в котором используется только одна операция электронной литографии, для формирования основания («ножки») Т-образного затвора, а для формирования канала и «шляпы» затвора обычная фотолитография i-line диапазона ($\lambda = 365$ нм). В зарубежной литературе подобная технология формирования затворов получил название гибридной (hybrid technology), а метод литографии – mix and match lithography.

Уменьшение длины затвора как в полевых транзисторах на Si, так и в полевых транзисторах A_3B_5 за последние несколько десятилетий стали основным фактором, способствующим быстродействию устройства. Т-образные затворы по существу представляют собой физическую конструкцию из двух частей, в которой небольшая «ножка» образует электрический контакт с каналом полевого транзистора, в то время как более широкая «шляпка» обеспечивает доступ к «ножке» с низким сопротивлением. Пример показан на рисунке 1.

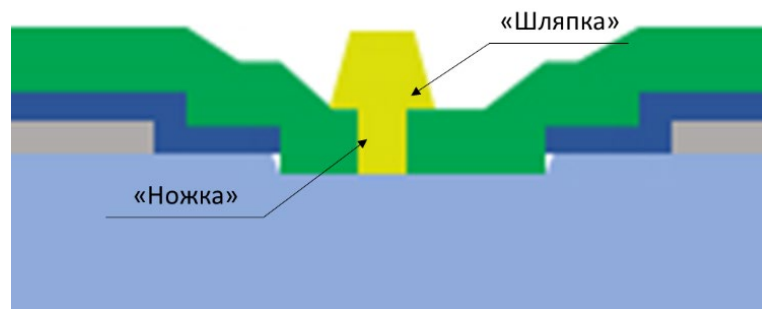


Рисунок 1. Внешний вид Т-образного затвора.

Электронно-лучевая литография (E-beam) в сочетании с трехслойной резистивной (PMMA)/(PMMA & PMAA, сополимер)/PMMA или (PMMA)/(SF9)/(PMMA) традиционно использовалась для изготовления Т-образных затворов. Также возможно использовать двухслойную резистивную систему PMMA/ (PMMA&PMAA). Этот процесс основан на различных скоростях проявления экспонированного сополимера и PMMA [1]. Преимущества этого процесса заключаются в одноэтапном формировании как «ножки», так и «шляпки», а также в самосовмещении «шляпки» на «ножку». Тем не менее, «шляпка» и условия воздействия на «ножку» сильно взаимодействуют друг с другом и приводят к взаимозависимости размеров «ножки» и «шляпки». Поскольку процесс зависит от различных скоростей проявления сополимера и PMMA для формирования Т-образного затвора, размер «ножки» критически зависит от времени проявления, толщины сополимера и консистенции химического состава сополимерного резиста. Поэтому идеальным процессом формирования Т-образного затвора является тот, при котором литография «ножки» может быть выполнена полностью независимо от формирования «шляпки», т.е. в 2 этапа [2]. Таким образом, можно было бы на 100% независимо контролировать форму и размеры «ножки» и «шляпки» Т-образного затвора. Гибридная технология Т-образного затвора и все процессы с оптическим рисунком достигают этой цели в производственных условиях, но появляется проблема с самосовмещением «ножки» и «шляпки».



Рисунок 2. Первый этап – это формирование канала транзистора

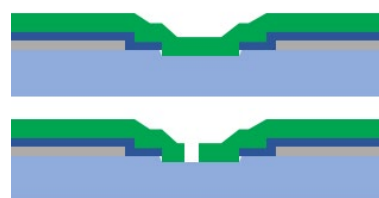


Рисунок 3. Второй этап – это формирование ножки будущего затвора



Рисунок 4. Третий этап - формирование шляпки затвора в электронном резисте



Рисунок 5. Напыление затворной металлизации, очистка поверхности

2. Гибридный Т-образный затвор

В гибридном процессе Т-образного затвора мы используем оптическую литографию для формирования канала и «шляпки» затвора, а «ножку» затвора с

помощью электронной литографии. «Ножка» затвора наносится всего на один слой РММА. Толщина РММА зависит от разрешающей способности резиста и колеблется от 2000 до 4000 Å. Можно полностью оптимизировать размер и профиль «ножки», поскольку нужно заниматься только литографией «ножки» в одном слое РММА. Контроль критического размера «ножки» превосходит контроль двухслойных или трехслойных методов обработки РММА / (сополимер РММА) примерно в восемь раз.

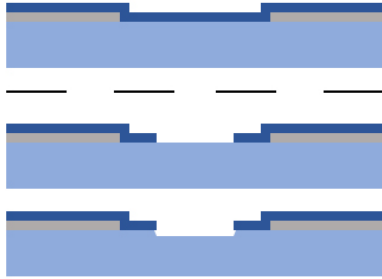


Рисунок 6. Первый этап – это формирование канала транзистора проекционной литографией с помощью шаблона

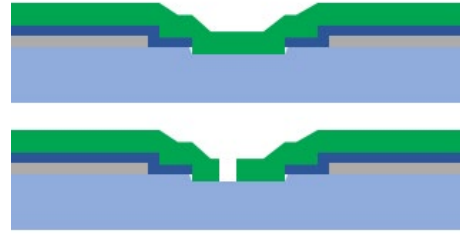


Рисунок 7. Второй этап – это формирование ножки будущего затвора

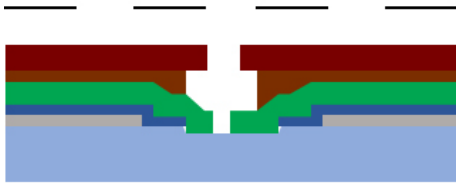


Рисунок 8. Третий этап - формирование шляпки затвора проекционной литографией с помощью шаблона



Рисунок 9. Напыление затворной металлизации, очистка поверхности

В ходе разработки технологического процесса канал и «шляпка» затвора формировались с использованием установки проекционной литографии Nikon NSR2205i12D. Была достигнута точность совмещения слоев $3\sigma = \pm 0,06$ мкм. Для достижения такой точности использовался алгоритм совмещения EGA (Enhanced Global Alignment). Совмещение фотошаблона проводилось по 35 знакам. Формирование «ножки» затвора проводилось с помощью установки электронной литографии EBP5200 [3].

Геометрические размеры Т-образных затворов в используемых мощных усилителях должны иметь следующие параметры, представленные в таблице 1. В данный диапазон входит как допуск по рассовмещению, так размеры для разных кристаллов.

Таблица 1. Спецификация геометрических размеров затвора

	Спецификация
Длина канала, нм	$800 < L_k < 900$
Длина «ножки», нм	$210 < L_{g1} < 270$
Длина «шляпки», нм	$700 < L_{g2} < 850$
Канал от контакт	$850 < L_1 < 1000$
Канал- затвор	$100 < L_2 < 150$

При сравнении полученных результатов формирования канала и «шляпки» с помощью фотолитографии по сравнению с электронной литографией, мы получили

такие же требуемые линейные размеры (рисунок.10, 11), а именно, длина канала – 0,89 мкм, размер «шляпы» - 0,8 мкм, размер «ножки» - 0,25 мкм, что соответствует размерам, получаемым с помощью метода электронной литографии

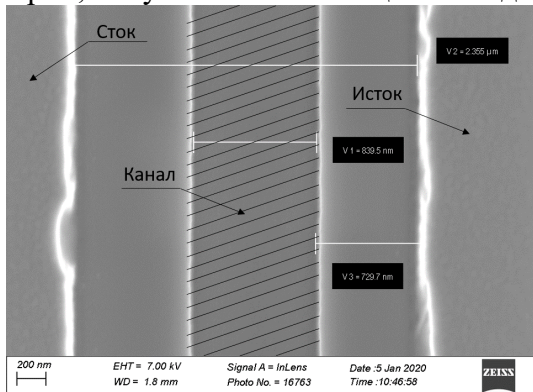


Рисунок 10. Вид сверху на сформированный канал

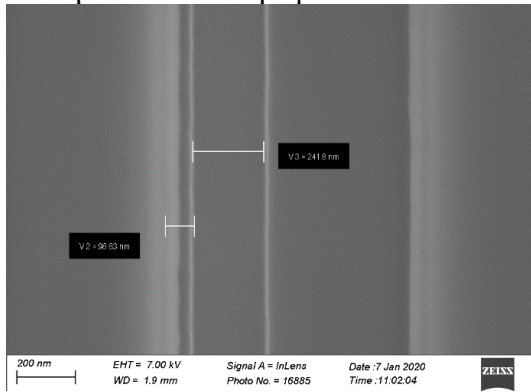


Рисунок 11. Вид сверху на сформированную «ножку» затвора

Среднее значение рассовмещения канал-омический контакт по гибридной технологии, т.е. для проекционной литографии 6,5 нм (по модулю), для электронной - 6,8. Расстояние канал-затвор для гибридной технологии, т.е. совмещение проекционной и электронной литографии 11,2 нм (по модулю), для стандартной технологии – 4,9 нм.

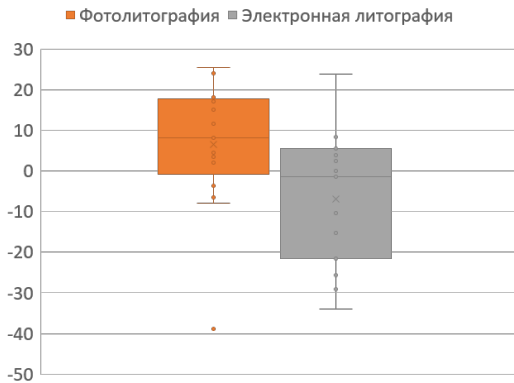


График 1. Рассовмещение канал-омические контакты, нм

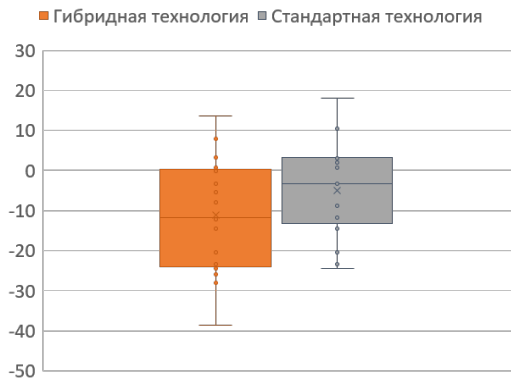


График 2. Рассовмещение канал-«шляпка» затвора, нм

Исходя из полученных выше данных линейные размеры формируемых T-образных затворов по гибридной технологии и с помощью электронной литографии идентичны, так же в пределах нормы находятся НЧ- и СВЧ- параметры транзистора (таблица 2).

Таблица 2. НЧ- и СВЧ-параметры мощного транзистора

Параметр	Норма	Гибридная технология	Стандартная технология
FTMAX (ГГц)	≥ 30 ГГц	34,2	32,3
VDMAXX100 (В)	≥ 19 В	21,8	21,4
MSGMAX10 (дБ)	≥ 13 дБ	16,9	16,8
RGLG (Ом)	1...9 Ом	11,6	7,8
IMAX1.5VX100 (А/мм)	0,4...1 А/мм	0,4	0,4
GMOPTX100 (См/мм)	0,4...1 См/мм	0,4	0,4
RKGM (Ом/кВ)	0,03...0,08 Ом/кВ	0,074	0,072
VT1VX100 (В)	-0,7...-0,4 В	-0,55	-0,58

Для сравнения на рисунке 12 и рисунке 13 представлены карты годности кристаллов на пластине по гибридной и стандартной технологии, из которых так же видно, что проекционная литография не ухудшает процент выхода годных.

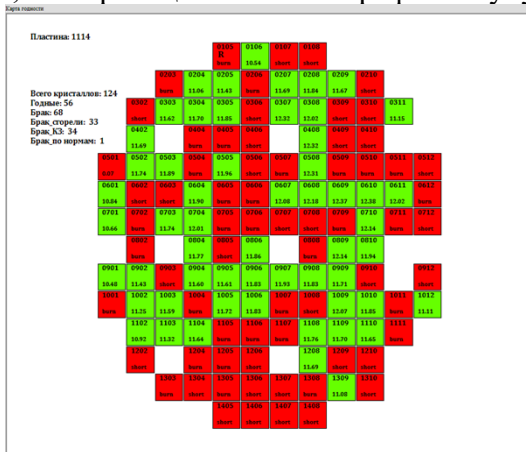


Рисунок 12. Гибридная технология

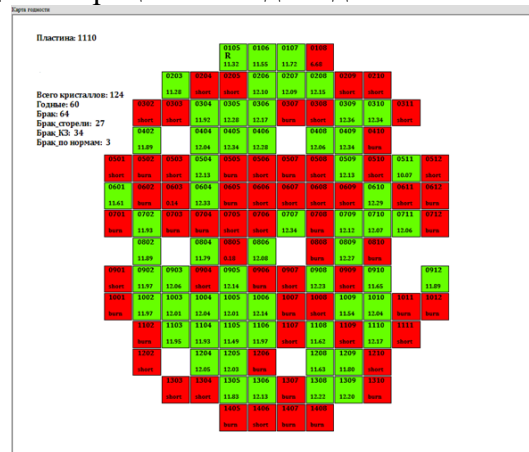


Рисунок 13. Стандартная технология

Таким образом мы можем говорить о взаимозаменяемости данных технологий. Но процесс формирования маски с помощью фотолитографии быстрее, чем электронная литография, а значит мы можем получить преимущество в скорости изготовления прибора.

Длительность процесса экспонирования одной пластины диаметром 76 мм на установке электронной литографии EPBG5200 составляет порядка 70 минут, в тоже время, длительность процесса экспонирования на установке Nikon NSR2205i12D составляет около 5 минут. Для формирования канально-затворной части транзистора необходимо провести 3 операции электронной литографии, формирование канала, ножки затвора и шляпки, чистое время экспонирования на которую уйдет 210 минут. По гибридной технологии, заменив электронную литографию на проекционную, при формировании канала и шляпки затвора чистое время экспонирования займет 80 минут.

Таким образом, показана возможность сокращения времени формирования канально-затворной части мощного транзистора без ухудшения его параметров.

3. Заключение

Разработаны альтернативы традиционным методам изготовления Т-образных затворов с использованием трехслойных резистов с использованием электронно-лучевой литографии (E-beam). Гибридный процесс Т-образного затвора, при котором «ножка» наносится в один слой PMMA, а канал и «шляпка» выполнена с использованием традиционной оптической литографии установки Nikon i12 устройства I-line, разработан и используется при изготовлении Т-образных затворов с размером «ножки» до 0,175 мкм. Гибридная технология изготовления Т-образных затворов позволяет воспроизводить линейные размеры каналов и затворов, как на электронно-лучевой литографии, при сохранении частотных характеристик приборов соответственно, но скорость формирования таких затворов на одной пластине выше в 2,5 раза. Заменив электронную литографию на фотолитографию для данной технологии изготовления приборов, мы можем снизить нагрузку на установки EPBG5200, которые сильно загружены, и они смогут формировать затворы по другим технологиям без задержки.

Список литературы

1. Y. Ynag, “Sub-quarter micron gate length high electron mobility transistors processing technology,” in Proc. Millemeter wave Far-infrared Technol. // ICMWFT. - 1989. - С. 532–535.

2. K. Onodera, K. Nishimura, S. Aoyama, S. Sugitani, Y. Yamane, and M. Hirano, “Extremely low noise performance of GaAs MESFET’s with wide-head T-shaped gate,” // IEEE Trans. Electron Devices. – 1999. - Т. 46. - С. 310–319.

3. Инструкция по эксплуатации установки проекционной фотолитографии Nikon NSR-2005i9C. Часть 1. Техническое описание и принцип работы // 2016. - С. 62-66.