

Возможна ли замена импортных СВЧ GaN-транзисторов от известных мировых производителей на отечественные аналоги?

С. Тарасов¹, Д. Колесников, к. т. н.², Г. Глушков³,
М. Полунин⁴, С. Рябыкин⁵, А. Ткачев, к. т. н.⁶

УДК 621.315.55 | ВАК 05.27.01

Компоненты на основе нитрида галлия рассматриваются как одно из ведущих направлений развития СВЧ-техники. Рынок СВЧ GaN-транзисторов сегодня почти полностью занят зарубежными компаниями. В связи с быстрым расширением сфер применения GaN-приборов как в военной, так и гражданской продукции развитие производства отечественных СВЧ GaN и силовых транзисторов становится ключевой задачей. В статье рассмотрены результаты измерения параметров GaN HEMT-транзистора производства АО «ПКС Миландр» в составе тестового усилителя мощности при работе в непрерывном режиме в диапазоне частот 3,4–3,8 ГГц, проведено сравнение полученных данных с характеристиками GaN-транзистора CGHV40030F от компании Wolfspeed. Представлены перспективные разработки АО «ПКС Миландр» в области СВЧ GaN HEMT-транзисторов для широкого диапазона частот и силовых транзисторов.

ВВЕДЕНИЕ

Транзисторы на основе широкозонных полупроводников, такие как AlGaN/GaN HEMT-транзисторы (транзисторы с высокой подвижностью электронов), занимают лидирующие позиции в области СВЧ- и силовой электроники, постепенно заменяя уже ставшие традиционными СВЧ LDMOS-транзисторы, GaAs-приборы, силовые кремниевые транзисторы. Это происходит по ряду причин, обусловленных свойствами нитрида галлия:

- большая ширина запрещенной зоны обеспечивает существенно более высокую напряженность поля пробоя и стойкость к СВВФ;
- возможность образования твердых растворов с Al и In и формирования гетероструктур с высокой концентрацией и подвижностью носителей;
- СВЧ GaN HEMT-транзисторы имеют значительно более высокую удельную выходную мощность (более 4 Вт/мм), широкий диапазон рабочих частот,

высокий коэффициент усиления по мощности и КПД;

- высокое пробивное напряжение сток-исток (более 120 В для напряжения питания 28 В и более 150 В для 50-В питания);
- более высокие рабочие частоты;
- силовые GaN HEMT-транзисторы отличаются сверхнизким сопротивлением в открытом состоянии, очень высоким быстродействием, малой входной емкостью и низкой энергией переключения.

Рынок мощных СВЧ и силовых GaN-транзисторов интенсивно растет, и, по прогнозам, этот рост будет продолжаться на протяжении более десяти ближайших лет, в течение которых сфера применения этих приборов будет расширяться. Наиболее широкое применение эти компоненты находят в таких областях, как 5G, Wi-Fi, беспилотные летательные аппараты, радарные комплексы, мобильные телекоммуникации, спутниковые системы, системы электропитания телекоммуникационного оборудования, высокоэффективные малогабаритные ИВЭП для жестких условий эксплуатации, автотелекоммуникация и др.

Рынок GaN-приборов сегодня представлен практически только зарубежными компаниями – EPC, Infineon, Integra, Qorvo, Wolfspeed, Ampleon, Microsemi и др.

¹ АО «ПКС Миландр», ведущий инженер, tarasov.s@milandr.ru.

² АО «ПКС Миландр», директор ЦП ИС, kolesnikov.d@milandr.ru.

³ АО «ПКС Миландр», директор ОП, glushkov.g@milandr.ru.

⁴ АО «ПКС Миландр», начальник лаборатории, polunin.m@milandr.ru.

⁵ АО «ПКС Миландр», инженер 1-й категории, ryabykin.s@milandr.ru.

⁶ АО «ПКС Миландр», начальник лаборатории, tkachev.a@milandr.ru.

Таблица 1. Технологические процессы компании Wolfspeed для производства НЕМТ-транзисторов и МИС [1]

Параметр	Технологический процесс Wolfspeed				
	G28V5	G28V4	G40V4	G28V3	G50V3
Длина затвора, мкм	0,15	0,25	0,25	0,4	0,4
Рабочее напряжение питания, В	28	28	40	28	50
Пробивное напряжение сток-исток, В	>84	>120	>120	>120	>150
Удельная выходная мощность, Вт/мм	3,75	4,5	6,0	4,5	8,0
Рабочие частоты, ГГц	DC-40	DC-18	DC-18	DC-8	DC-6
Толщина подложки, мкм	75	100	100	100	100
Материал подложки	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC
Полевой электрод	SFP	SFP	SFP	SFP	SFP

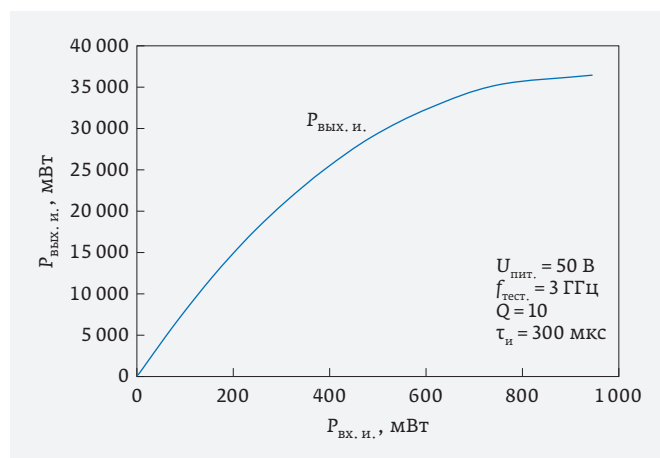
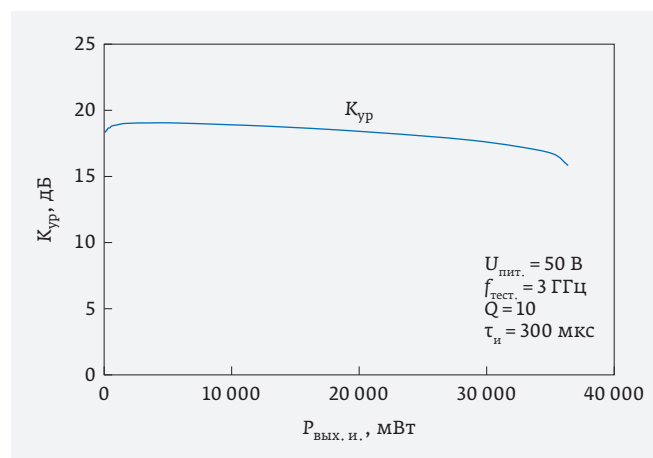
Отечественные предприятия только начинают его осваивать. В связи с интенсивным расширением сфер применения GaN-приборов как в военной, так и гражданской продукции развитие производства отечественных СВЧ GaN- и силовых приборов становится стратегически важной задачей.

Большинство зарубежных компаний выращивание эпитаксиальных слоев и изготовление кристаллов выполняют на пластинах диаметром 100 мм. Тем не менее foundry-компании не оставляют попыток перейти на изготовление структур с транзисторными кристаллами на пластинах диаметром 150 и 200 мм.

В табл. 1 представлены параметры технологических процессов Wolfspeed, одной из ведущих компаний, предлагающих услуги по изготовлению транзисторных кристаллов и приборов на их основе, а также монолитных интегральных схем (МИС).

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО СВЧ GaN-ТРАНЗИСТОРА

В АО «ПКК Миландр» был разработан и изготовлен GaN-транзистор мощностью 25 Вт в металлокерамическом корпусе (аналог корпуса типа 440166). Был проведен сравнительный анализ характеристик разработанного транзистора с параметрами транзистора CGHV40030F от компании Wolfspeed, одного из ведущих производителей СВЧ GaN-приборов. Кроме статических характеристик были измерены энергетические параметры транзисторов: выходная импульсная мощность, коэффициент усиления по мощности и коэффициент полезного действия стока на большом сигнале. Исследования разработанного АО «ПКК Миландр» транзистора проводились на стенде для измерения энергетических параметров мощных СВЧ-транзисторов с автоматическим согласованием по входу и выходу. Результаты измерений представлены на рис. 1–3.

**Рис. 1.** Зависимость выходной импульсной мощности от входной импульсной мощности**Рис. 2.** Зависимость коэффициента усиления по мощности от выходной импульсной мощности

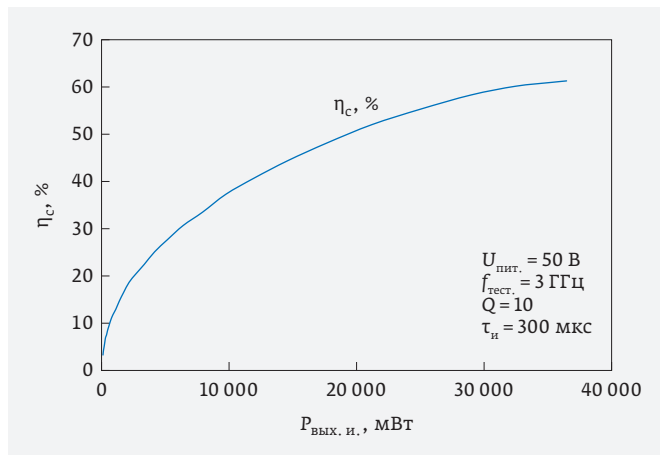


Рис. 3. Зависимость коэффициента полезного действия стока от выходной импульсной мощности

Полученные значения параметров разработанного транзистора – $P_{\text{вых. и.}} \geq 25$ Вт, $K_{\text{уп}} \geq 18$ дБ, $\eta_{\text{с}} \geq 55\%$ на частоте 3 ГГц при напряжении питания 50 В – подтверждают, что отечественный транзистор соответствует лучшим мировым аналогам.

РАЗРАБОТКА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Подходы к проектированию усилителя мощности для систем радиосвязи, как правило, различаются в зависимости от назначения системы, которая может быть системой связи общего назначения (например, системы связи стандарта Wi-Fi, Bluetooth или WiMax для диапазона частот 2,4 ГГц) или системой связи или подавления радиосигналов специального назначения для частотного диапазона, определяемого требованиями заказчика. В первом случае оптимальный выбор для разработчика – использовать схему усилителя мощности из технической документации и руководства к применению компании-производителя усилительных приборов, либо использовать внутренне

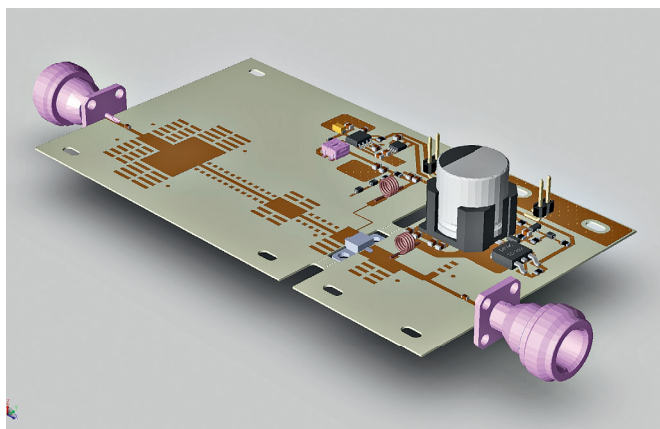


Рис. 4. 3D-модель усилителя мощности

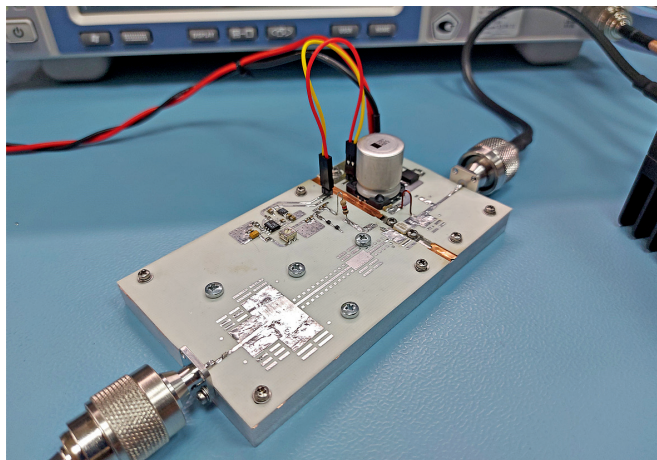


Рис. 5. Макет усилителя мощности с импортным транзистором CGHV40030F

согласованный по входу и выходу к стандартному 50-Ом тракту усилитель.

В АО «ПКК Миландр» была разработана схема усилителя мощности на основе импортного транзистора CGHV40030F и изготовлен макет устройства. В спецификации на транзистор CGHV40030F указаны следующие параметры: $P_{\text{вых.}} = 30$ Вт (в режиме насыщения), коэффициент усиления по мощности $K_{\text{уп}} = 15$ дБ, коэффициент полезного действия стока $\eta_{\text{с}} = 60\%$ (параметры измерены на частоте 1,2 ГГц при температуре окружающей среды 25 °С) [2]. Разработанная 3D-модель и макет усилителя приведены на рис. 4–6.

Разработанный тестовый усилитель мощности рассчитан на частотный диапазон 3,4–3,8 ГГц, используемый в России для систем связи специального назначения, а в Европе и США выделяемый для перспективных сетей связи пятого поколения.

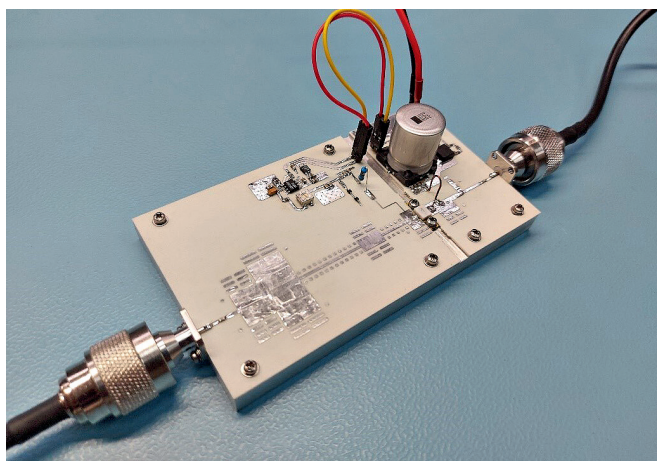


Рис. 6. Макет усилителя мощности с GaN-транзистором производства АО «ПКК Миландр»

Разработка усилителя включала в себя несколько этапов:

- синтез входной согласующей цепи с оптимальным согласованием в рабочем диапазоне частот;
- синтез выходной согласующей цепи, обеспечивающей максимальную выходную мощность;
- проверку стабильности усилителя мощности.

Согласно теореме Бодэ-Фано минимальный входной КСВН (обеспечивающий максимум мощности сигнала возбуждения на входе усилительного прибора) в заданной полосе частот достигается при использовании структуры, аналогичной структуре полосового фильтра [3]. На основе компактной модели усилительного прибора была определена эквивалентная схема входа в виде последовательной RLC-цепи (где величины R и L определяют, соответственно, активную часть импеданса и индуктивность проводов, соединяющих вывод затвора и кристалл, а C — емкость затвора усилительного прибора). Синтез входной согласующей цепи проводился в программе Keysight PathWave ADS, среди возможных вариантов построения цепи был выбран оптимальный с точки зрения физической реализации устройства на основе микрополосковой технологии.

Для синтеза выходной согласующей цепи был проведен схематический load-pull-тест в Keysight PathWave ADS. В качестве схемы использовалась модель усилительного прибора с входной согласующей цепью и цепями смещения и питания, в процессе моделирования был выбран оптимальный, с точки зрения выходной мощности, импеданс нагрузки. На основе полученных данных была спроектирована выходная согласующая цепь.

При использовании индуктивности в качестве развязывающего элемента по ВЧ в цепи смещения по входу возможно возникновение паразитных колебаний [4]. Для стабилизации усилителя по входу и развязки по ВЧ цепи смещения был использован выводной металлопленочный резистор номиналом 1 кОм, смонтированный вертикально в разрыв цепи.

После сборки макета усилителя мощности были проведены сравнительные измерения электрических параметров совместимых по выводам импортного и отечественного транзисторов в полосе частот 3,4–3,8 ГГц в непрерывном режиме. Сравнительные данные, полученные при измерениях, представлены на рис. 7–8.

Результаты измерений параметров транзисторов в составе усилителя мощности подтверждают возможность замены зарубежных приборов на отечественные транзисторы в аппаратуре российских компаний без внесения разработчиками каких-либо корректировок и изменений в уже разработанные образцы изделий.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ СВЧ GaN-ТРАНЗИСТОРОВ АО «ПКК МИЛАНДР»

В настоящее время АО «ПКК Миландр», помимо разработки усилителей мощности на основе GaAs и GaN для X-диапазона, осуществляет разработку перспективных дискретных СВЧ GaN-транзисторов с рабочим напряжением питания 50 В. Ведется разработка линейки СВЧ GaN HEMT-транзисторов для L-, S-, и C-диапазонов частот. Разрабатываемые транзисторы по своим техническим характеристикам соответствуют лучшим мировым аналогам, что позволит российским проектировщикам аппаратуры и оборудования перейти на отечественную ЭКБ.

Для L-диапазона частот создается линейка транзисторов с выходной мощностью 5, 10, 25, 50, 500 и 1000 Вт,

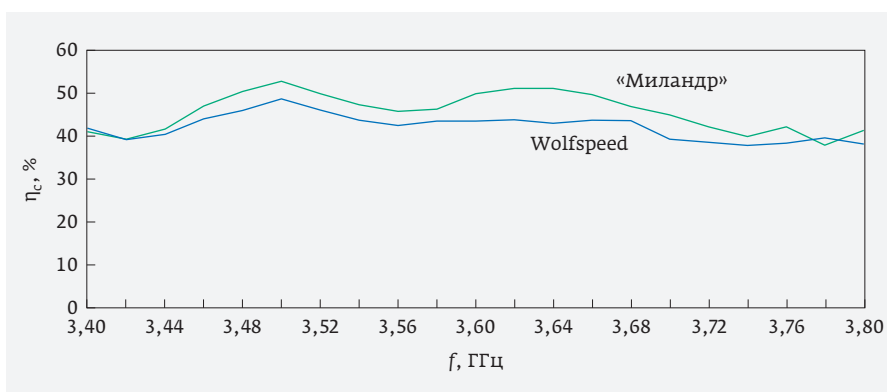


Рис. 7. Зависимость коэффициента полезного действия стока в диапазоне частот при непрерывном режиме работы

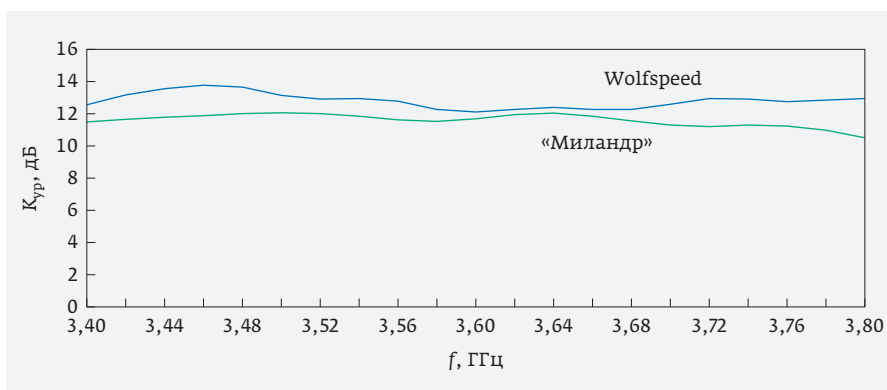


Рис. 8. Зависимость коэффициента усиления по мощности в диапазоне частот при непрерывном режиме работы

которые позволяют заменить импортные транзисторы таких компаний, как Integra, Qorvo, Wolfspeed, Ampleon, Microsemi. Для каждого типа транзистора будет разработан тестовый усилитель мощности, что позволит потенциальным заказчикам и потребителям сократить время разработки и перейти к опробованию транзисторов в составе своей аппаратуры. Специалисты АО «ПКК Миландр» уже разработали тестовый усилитель мощности для диапазона частот 3,8–4,3 ГГц.

Для S-диапазона частот также разрабатывается широкая номенклатура СВЧ GaN-транзисторов, которая позволит улучшить тактико-технические характеристики отечественных изделий. Выходная мощность составит от 5 до 1000 Вт. Данная номенклатура позволит создать как предусилитель, так и усилитель мощности, не прибегая к использованию импортных комплектующих.

Для C-диапазона частот разрабатывается ряд транзисторов, которые будут применяться в том числе для создания отечественного оборудования сетей 5G.

Сборка транзисторных кристаллов будет осуществляться в стандартных металлокерамических корпусах.

Необходимость в создании такого класса изделий твердотельной СВЧ-электроники определяется задачей реализации оптимальных схемотехнических решений при многомодульном построении мощных усилительных трактов передающей аппаратуры L-, S- и C-, X-диапазонов. Мощные импульсные СВЧ GaN-транзисторы производства АО «ПКК Миландр» позволят добиться максимальной эксплуатационной эффективности аппаратуры, уменьшения массогабаритных характеристик и сроков ее разработки.

Учитывая преимущества силовых GaN-транзисторов, в АО «ПКК Миландр» принято решение о развитии, кроме направления СВЧ-транзисторов, также направления разработки силовых GaN-транзисторов для применения в малогабаритных модулях питания. В настоящее время активно ведется разработка нормально-закрытых силовых GaN-транзисторов, конструктивно аналогичных транзисторам ведущих зарубежных компаний – EPC, GaN Power, GaN System и др. Разрабатывается линейка транзисторов с максимально допустимым напряжением сток-исток для трех основных диапазонов – 60, 200–250 и 650 В. Первые тестовые образцы будут доступны в начале 2021 года.

Специфика силовых GaN-транзисторов выдвигает жесткие требования к параметрам драйверов затворов. Основная масса серийных драйверов затворов предназначена для МОП-транзисторов и не удовлетворяет специфическим требованиям GaN-приборов. Использование таких драйверов для управления GaN-транзисторами проблематично и может вызывать их ускоренную деградацию и выход из строя.

Ряд ведущих зарубежных компаний начали выпуск специализированных драйверов для GaN-транзисторов, в том числе с интегрированной гальванической развязкой.

Отечественных специализированных драйверов для GaN-транзисторов на текущий момент нет.

У заказчиков АО «ПКК Миландр» востребована связка «GaN-транзистор – специализированный драйвер затвора», желательно с интегрированной гальванической развязкой. Поэтому в настоящее время ведется разработка линейки специализированных драйверов затвора GaN-транзисторов. Предварительно линейка будет включать в себя четыре варианта драйверов – одноканальные и полумостовые, с гальванической развязкой и без нее. Отечественные аналоги разрабатываемых специализированных драйверов GaN-транзисторов отсутствуют. Разрабатываемые драйверы будут пригодны для использования как с GaN-транзисторами от АО «ПКК Миландр», так и с наиболее распространенными зарубежными транзисторами компаний EPC, GaN Power, GaN System и других ведущих производителей.

Актуальные разработки АО «ПКК Миландр» в области транзисторов на основе широкозонных полупроводников для СВЧ и силовой электроники позволят не только создавать аппаратуру для управления воздушным движением, мобильной телекоммуникации, наземных и метеорологических станций, спутниковой связи (GPS, ГЛОНАСС), квадрокоптеров и др., но также будут способствовать появлению отечественного оборудования для сетей 5G и цифровизации экономики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В АО «ПКК Миландр» был разработан тестовый усилитель мощности для диапазона частот 3,4–3,8 ГГц для проверки работы СВЧ GaN-транзисторов в непрерывном режиме при напряжении питания 50 В. Замена импортного транзистора CGHV40030F на совместимый по выводам транзистор производства АО «ПКК Миландр» в тестовом усилителе показала, что разработанный транзистор по своим энергетическим параметрам находится на уровне лучших мировых аналогов, что говорит о возможности применения отечественного СВЧ GaN-транзистора вместо импортного прибора.

Разработки компании в области нитрид-галлиевой СВЧ и силовой электроники позволят обеспечить российских разработчиков электроники отечественными передовыми приборами для решения практически любых перспективных задач, как в гражданской сфере, так и в технике специального назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.wolfspeed.com/rf/foundry-services>.
2. <https://www.wolfspeed.com/rf/products/s-band/cghv40030>.
3. **Sechi F., Bujatti M.** Solid-State Microwave High-Power Amplifiers. – Artech House. 2009.
4. **Cripps S. C.** RF Power Amplifiers for Wireless Communications. – Artech House, 2nd ed. 2006.

