

ИНФОРМАЦИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СЕРИИ AN-007 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ GaN, Si И GaAs ДЛЯ ВЧ- И СВЧ-УСТРОЙСТВ

Статья предлагает обзор преимуществ и недостатков технологии GaN и ее конкурентов для ВЧ-/СВЧ-устройств, а также в качестве дополнения представляет двунаправленный трехдиапазонный усилитель NuPower Xtender SCISR-20 компании NuWaves Engineering. Оригинал статьи доступен по ссылке [1], дополнения по ссылке [2].

ВВЕДЕНИЕ

Инженеры, которые в последние 10–15 лет занимались проектированием высокочастотных устройств, уже хорошо осведомлены об особенностях такого полупроводникового материала, как нитрид галлия (GaN), и постепенном завоевании им рынка высокочастотных полупроводниковых приборов, которые находят широкое применение в различных приложениях. Теме превосходства GaN над его конкурентами, выполненными на основе классического кремния (Si) и хорошо зарекомендовавшего себя в прошлом арсенида галлия (GaAs), посвящено очень много технических статей, информации по применению, блогов и вебинаров. Однако для того, чтобы понять преимущества (и недостатки) той или иной полупроводниковой технологии для каждого конкретного приложения, важно точно знать разницу между этими технологиями и трезво оценивать

их возможности. С этой целью давайте проведем краткий анализ приборов и технологий, используемых в технике высоких (ВЧ) и сверхвысоких частот (СВЧ).

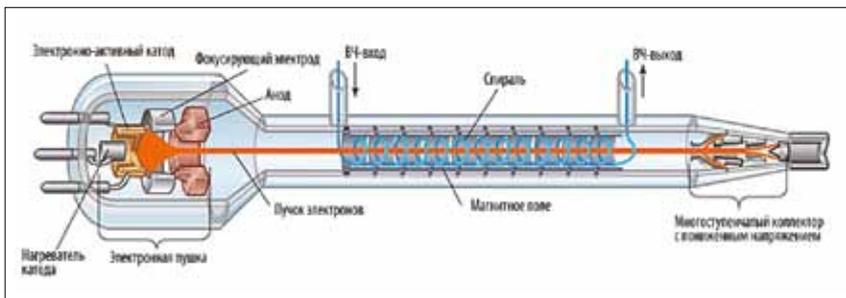
ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Лампы бегущей волны (ЛБВ, в англ. *TWT om travelling-wave tube*) исторически использовались для усиления мощности на высоких частотах, когда требовалось достичь высокой мощности (рис. 1). ЛБВ — это электровакуумные приборы, в которых для генерирования и/или усиления электромагнитных колебаний СВЧ используется взаимодействие бегущей электромагнитной волны и электронного потока, движущихся в одном направлении ЛБВ. Они специально разработаны для усиления ВЧ-сигналов в диапазоне от 300 МГц до области миллиметровых частот (до 50 ГГц, по некоторым данным до 300 ГГц). Несмотря

на то, что ЛБВ способны справляться с высокими уровнями мощности и все еще применяются в некоторых приложениях, они из-за своей низкой надежности, большого размера и разбросов характеристик, связанных с наличием конструктивных отклонений, в настоящее время считаются морально устаревшими компонентами, хотя и выпускаются почти десятком компаний в разных странах.

ПОЛЕВЫЕ Si-ТРАНЗИСТОРЫ С ЛАТЕРАЛЬНЫМ РАССЕЙВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

МОП-транзисторы, в данном случае речь пойдет об их разновидности LDMOS (от англ. *laterally diffused metal oxide semiconductor*) — транзисторах с латеральным рассеиванием, имеют одно значительное преимущество. Поскольку большинство устройств LDMOS изготовлено на базе кремния, они выигрывают с точки зрения способности обеспечить усиление для достижения высокой мощности при низкой стоимости. LDMOS-транзисторы могут обеспечить более 100 Вт высокочастотной выходной мощности в области СВЧ и до киловатт мощности на частотах, не превышающих 1 ГГц. Пока производители работают над их дальнейшим совершенствованием, главным правилом при проектировании остается следующее: «LDMOS-транзисторы хорошо подходят для ши-



▲ Рис. 1. Стандартный усилитель на лампе бегущей волны (Britannica, 2010)

Таблица 1. Характеристики транзисторов GaN-, GaAs- и LDMOS-технологий

	GaN	GaAs	LDMOS
Линейность	Низкая ¹	Умеренная	Высокая
Частота	До 30 ГГц	До 250 ГГц	До 3–4 ГГц
Мощность	10–100 Вт, высокая удельная плотность мощности ² (5–10 Вт/мм)	10–20 Вт, низкая удельная плотность мощности ² (1,5 Вт/мм)	100–1000 Вт, низкая удельная плотность мощности ² (1–1,5 Вт/мм)
Стоимость	Высокая (4–5 \$/Вт)	Средняя (1–2 \$/Вт)	Низкая (1–2 \$/Вт)
Полоса пропускания	Широкая	От узкой к средней	Узкая (> 1 ГГц); Широкая (< 1 ГГц)

Примечание.¹ Зачастую линейность за счет ссылки только на одну точку сжатия P_{1дБ} неверно интерпретируется и не вполне точно отражает линейную характеристику устройств GaN. Кривая постепенного сжатия, характерная для GaN, даже если реальные характеристики могут отвечать критериям, указанным для данного устройства инженером, обычно приводит к снижению значений P_{1дБ}. Линейность лучше определять как работу в точке на кривой передачи, где достигается наиболее важный параметр для каждого конкретного устройства. Например, довольно часто можно увидеть приемлемые значения вектора ошибки (EVM) измерения в GaN-устройстве с очень низким значением P_{1дБ}.

² На 1 мм ширины затвора.

рокополосного усиления ниже 1 ГГц, а также для узкополосного на частотах выше 1 ГГц». Кроме того, LDMOS считаются надежными компонентами, чрезвычайно устойчивыми к воздействиям. Они в состоянии работать со значительным рассогласованием импеданса без повреждений и деградации и имеют преимущество при функционировании на рабочих напряжениях до 50 В. Удельная выходная мощность на 1 мм ширины затвора для транзисторов технологии LDMOS составляет 1–2 Вт/мм. Пределом рабочих частот для LDMOS обычно считается 3–4 ГГц, поскольку на более высоких частотах их выходной импеданс становится все труднее согласовать.

АРСЕНИД ГАЛЛИЯ — GaAs

GaAs — это универсальный полупроводниковый материал, как и Si LDMOS, является уже полностью зрелым. GaAs-транзисторы способны работать в широком диапазоне частот от 30 МГц и до миллиметровых частот 250 ГГц и успешно применяются как в широкополосных, так и в узкополосных приложениях. Кроме того, GaAs-транзисторы генерируют очень мало собственного шума и могут работать с низкими уровнями входных сигналов. Удельная выходная мощность на 1 мм ширины затвора у GaAs-транзисторов обычно составляет около 1,5 Вт/мм. К недостаткам GaAs-транзисторов следует отнести возможность усиления мощности, поскольку из-за низкого напряжения пробоя, которое, как правило, находится в пределах 5–12 В, она ограничена примерно 5–10 Вт выходной мощности. Кроме того, транзисторы рассматриваемого типа не могут выдерживать высокие температуры, с которыми легко справляются транзисторы, выполненные на основе GaN и Si.

Справедливости ради следует отметить, что использование транзисторов на основе арсенида галлия дает возможность получать более высокие выходные мощности вплоть до 20–40 Вт. Это достигается благодаря тому, что данные транзисторы могут устанавливаться в двухтактных, параллельных конфигурациях

или в конфигурации с объединением выходов. Однако такие конфигурации не получить без потерь по КПД и увеличения площади, необходимой для организации их периферийных схем.

НИТРИД ГАЛЛИЯ — GaN

Использование нитрида галлия (GaN) стало прорывом в полупроводниковых технологиях для областей ВЧ и СВЧ. Главным преимуществом GaN перед конкурентами является его высокая удельная плотность мощности, которая может в 5 раз превосходить показатели сопоставимого полупроводникового прибора, выполненного на основе GaAs. Проще говоря, это значит, что мы получаем в 5 раз большую мощность в корпусе размером на 80% меньше.

GaN-транзистор, по сравнению с приборами на основе Si и GaAs, способен обеспечить от десятков до сотен ватт выходной мощности и работать в пределах вплоть до миллиметрового диапазона с высокой эффективностью и улучшенной пропускной способностью (линейностью). Частично это достигается благодаря тому, что GaN-устройства имеют более плавную кривую перехода в насыщение, то есть усилители могут работать дальше в области насыщения, где эффективность выше. Кроме того, у GaN-устройств, предназначенных для работы в ВЧ- и СВЧ-диапазонах, по сравнению с транзисторами на основе GaAs, более высокое напряжение пробоя, которое находится в диапазоне 28–50 В. В результате низкая входная емкость и высокая резистивная составляющая в импедансе приводят к более высокому входному импедансу, что упрощает процесс согласования и обеспечивает широкополосную функциональность, которая ранее была недоступна.

Однако здесь имеется один нюанс — для того, чтобы улучшить относительно слабые тепловые характеристики GaN, транзисторы на его основе почти всегда формируются на подложках с более низкими потерями и высокой теплопроводностью, таких как карбид кремния, в результате мы имеем GaN-на-SiC. Еще

одним распространенным материалом подложек для устройств GaN является кремний, в этом случае формируют GaN-на-Si. Благодаря использованию хорошо отлаженных техпроцессов производства кремния GaN-на-Si становятся более дешевой альтернативой, чем GaN-на-SiC, хотя происходит это за счет снижения производительности. Меньшая теплопроводность кремния, по сравнению с карбидом кремния ограничивает выходную мощность примерно до 10 Вт. Кроме того, вариант GaN-на-Si не подходит для устройств, предназначенных для частот выше 6 ГГц, так как коэффициент усиления, эффективность (КПД) и выходная мощность устройств падают с увеличением частоты.

Весьма перспективным сегодня представляется растущий интерес к использованию синтетических алмазов в качестве подложек для GaN-устройств (GaN-на-алмазе). Алмаз имеет самую высокую теплопроводность из всех материалов, известных человеку, и первые исследования показывают, что GaN-на-алмазе может дать удельную плотность мощности в 10 раз выше, чем доступные сейчас варианты GaN-на-SiC. Однако производство синтетических алмазов остается еще слишком дорогим, чтобы технология GaN-на-алмазе распространилась довольно широко. Впрочем, по мере того, как эти процессы будут совершенствоваться и набирать обороты, невероятные преимущества теплового управления, свойственные алмазам, превзойдут затраты на их производство, открывая новые возможности проектирования в сфере ВЧ и СВЧ.

LDMOS ПРОТИВ GaAs ПРОТИВ GaN: ЧТО СЛЕДУЕТ ИСПОЛЬЗОВАТЬ И КОГДА?

Учитывая экстраординарные преимущества технологий GaN, легко предположить, что GaN должен заменить LDMOS и GaAs во всех устройствах. Конечно, в действительности все не так просто, и многие считают, что LDMOS и GaAs будут использоваться еще много лет. В таблице 1 представ-

лен обзор трех этих технологий. Говоря в целом, GaN является очевидным решением для приложений выше 3 ГГц, требующих выходной мощности более 25 Вт. Вне этих условий выбор между LDMOS, GaAs, и GaN становится более сложным, требующим тщательного анализа компромиссов по производительности и стоимости. Приложения с высокой мощностью, где необходима работа ниже 3 ГГц, — например, бес-

проводные базовые станции, зачастую больше выигрывают от использования более дешевых и проверенных LDMOS-технологий. Что касается применения GaAs, здесь также рассматривается диапазон выше 30 ГГц.

Нужно учитывать и то, что сегодня уже производится десятое поколение кремния и его выращивают на пластинах 12–18 дюймов. Для сравнения, GaN пока еще находится во втором поколении,

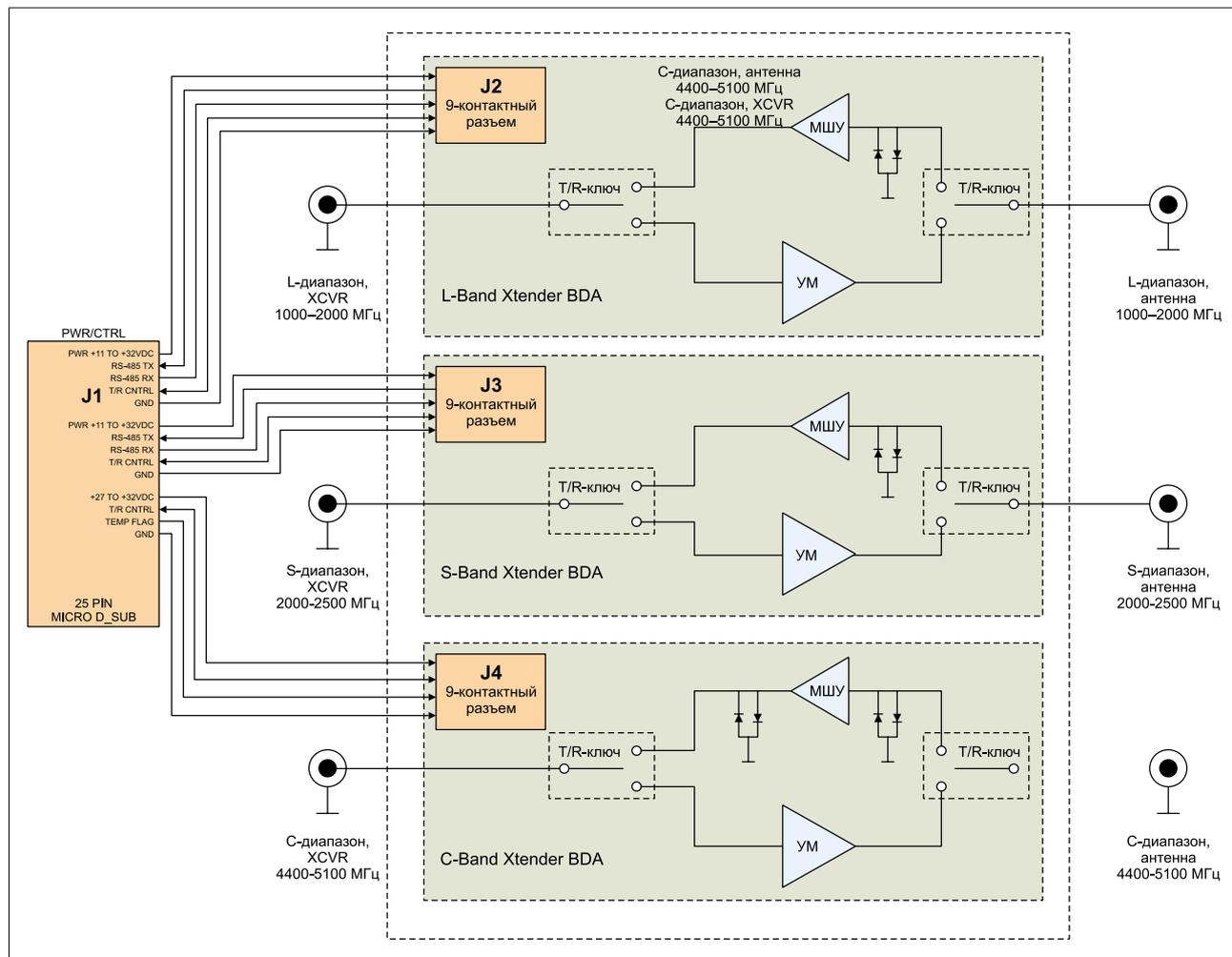
и его можно выращивать на пластинах 4 дюйма, тогда как затраты остаются сопоставимыми. Следовательно, в приложениях малой мощности, скорее всего, будут по-прежнему использоваться более дешевые GaAs-устройства, до тех пор пока стоимость GaN не снизится за счет их более широкого распространения в высокочастотной отрасли.

СОВРЕМЕННОЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ GaN В УСИЛИТЕЛЯХ

Как можно видеть из приведенного анализа, транзисторы на основе GaN, выполненные по современной высокочастотной технологии, благодаря значительным улучшениям надежности и высокой удельной плотности мощности считаются наиболее оптимальным выбором для самого широкого спектра приложений. Компания NuWaves Engineering, одной из первых взявшая на вооружение технологию GaN, старается работать в этом направлении и крайне заинтересована в передовых новейших технологиях в сфере ВЧ-усилителей мощности (PA — от англ. *power amplifier*). На рис. 2 представлено одно из решений компании, иллюстрирующее ее достижения в области



▲ Рис. 2. Двухнаправленный трехдиапазонный усилитель NuPower Xtender SCISR-20 компании NuWaves Engineering



▲ Рис. 3. Функциональная схема NuPower Xtender SCISR-20

Таблица 2. Основные технические характеристики двунаправленного трехдиапазонного усилителя NuPower Xtender SCISR-20 компании NuWaves Engineering.

Параметр	Значение
Частотный диапазон:	
L-диапазон	1000–2000 МГц
S-диапазон	2000–2500 МГц
C-диапазон	4400–5100 МГц
Выходная мощность ВЧ в режиме насыщения:	
L- и S-диапазон	20 Вт (типичная)
C-диапазон	10 Вт (типичная)
Номинальная входная мощность	+30 дБм
Максимальная входная мощность	+33 дБм
Коэффициент усиления приемника	
L- и S-диапазон	16 дБ (типичная)
C-диапазон	12,8 дБ (типичная)
Коэффициент шума приемника:	
L- и S-диапазон	2,0 дБ (типичная)
C-диапазон	2,8 дБ (типичная)
Режим переключения режима T/R (передача/прием)	Automatic Sensing or Manual T/R Line
Время переключения T/R (передача/прием)	2 мкс
Номинальное напряжение питания	28 В (DC)
Ток потребления в режиме передачи	
L- и S-диапазон	2,1 А при +28 В (DC), типичное при Pout = 20 Вт
C-диапазон	1,6 А при +28 В (DC), типичное при Pout = 12 Вт
Ток потребления в режиме приема:	
L- и S-диапазон	90 мА при +28 В (DC), типичное
C-диапазон	50 мА при +28 В (DC), типичное
Диапазон рабочих температур при 100% рабочем цикле	–40...+75 °С (основание)
Габаритные размеры:	7,25×4,50×1,375 дюймов (184,15×114,3×35,0 мм)
Вес	34 унции (964 г)

использований технологии GaN — двунаправленный трехдиапазонный усилитель NuPower Xtender SCISR-20 [2].

Семейство твердотельных двунаправленных радиочастотных усилительных модулей NuPower Xtender, или модулей T/R, предназначено для удовлетворения растущих потребностей аэрокосмического и оборонного, промышленного и коммерческого рынков. Основанный на новейшей технологии нитрида галлия (GaN) энергоэффективный и миниатюрный форм-фактор NuPower Xtender стал идеальным вариантом для широкополосных радиочастотных систем телеметрии и тактической связи. NuPower Xtender имеет компактные габариты, небольшой вес и ограничение по мощности. Усилители NuPower Xtender отличаются:

- **Высокая производительность:** уникальное сочетание широкополосного покрытия, миниатюрных форм-факторов и высокой эффективности.
- **Корпус:** семейство двунаправленных усилителей NuPower Xtender заключено в алюминиевый корпус с уже

встроенными монтажными отверстиями.

- **Предоставленные полные технические характеристики:** для семейства твердотельных двунаправленных усилителей NuPower Xtender предоставлены полные технические характеристики по температуре, напряжению и частоте. Эти высокопроизводительные модули представляют значительную ценность для OEM-пользователей или системного интегратора.
- **Удобство для пользователя:** защита от перенапряжения и тепловое отключение стабилизатора помогают избежать проблем с пользовательским интерфейсом.
- **Высокая надежность:** выбор компанией NuWaves Engineering консервативных вспомогательных компонентов обеспечивает усилителю высокую надежность. Каждый NuPower проходит проверку на соответствие стандартам качества IPC-A-610 Class II. Система управления качеством NuWaves Engineering серти-

фицирована по стандартам AS9100:2016 Rev D и ISO 9001:2015.

- **Приложения:** беспилотные авиационные системы (Unmanned Aircraft System, UAS), беспилотные наземные транспортные средства (Unmanned Ground Vehicle, UGV; Unmanned Surface Vehicle, USV), широкополосная радиочастотная телеметрия, радиочастотные системы связи, программно-конфигурируемые радиостанции, испытательные лаборатории.

Усилитель, предлагаемый компанией NuWaves Engineering, имеет исключительно высокую удельную плотность мощности и широкий диапазон рабочих частот, что характерно для устройств, выполненных на GaN-транзисторах. Модуль двунаправленного трехдиапазонного усилителя NuPower Xtender™ SCISR-20 — это небольшой, легкий и энергоэффективный двунаправленный усилитель (BDA), оптимальный для расширения диапазона связи полудуплексных трансиверов с использованием непрерывной волны (continuous wave, CW) и почти постоянной огибающей формы волны. В режиме передачи двунаправленный усилитель обеспечивает до 20 Вт в режиме насыщения в диапазонах частот L-, S- и 12 Вт в C-диапазоне и имеет встроенный малошумящий усилитель (МШУ), используемый в режиме приема при работе на общую антенну.

Схема усилителя NuPower Xtender SCISR-20 приведена на рис. 3, а его основные технические характеристики представлены в таблице 2. Полные технические характеристики усилителя доступны в [2].

NuPower Xtender SCISR-20 предлагается как отдельный модуль или как часть комплекта, который также содержит радиатор с принудительным охлаждением, адаптер переменного/постоянного тока и интерфейсный кабель с разъемами типа «банан»-джек.

Радиатор с вентиляторным охлаждением обеспечивает достаточное охлаждение для работы NuPower Xtender SCISR-20 при комнатной температуре (+25 °С), однако при более высоких температурах окружающей среды для поддержания температуры основания на уровне не выше +60 °С при 100%-ном рабочем цикле передачи может потребоваться дополнительный теплоотвод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Появление технологий на базе GaN стало серьезным достижением для общества ВЧ-/СВЧ-коммуникаций и их бенефициаров. Наибольшая плотность энерговыделения и гибкость рабочих частот, а также прочие преимущества позволили совершить прорыв,



**Сергей Шихов, технический директор
«А-КОНТРАКТ»:**

Полупроводниковые приборы на основе нитрида галлия для высокочастотной техники разработаны относительно недавно. Однако данные приборы, несмотря на их сравнительно более высокую стоимость, уже начинают приобретать все большую и большую популярность в области ВЧ и СВЧ.

Полностью заменить транзисторы, выполненные на основе арсенида галлия и тем более кремния, они пока не способны, но, безусловно, каждому из них найдется своя рыночная ниша.

результаты которого выходят далеко за пределы возможностей простого модуля усилителя или входного каскада. В частности, в отрасли авиации распространение GaN способствовало развитию беспилотников меньшего размера с большей дальностью полета. Сфера

исследования космоса также получила ряд выгод, поскольку здесь минимизация размера и веса имеет ключевое значение для успеха. И хотя влияние GaN невозможно не учитывать, остается очевидным, что во всех новых технологиях всегда есть место определенным

компромиссам между преимуществами и недостатками, которые должны быть тщательно изучены и проанализированы внимательным инженером. В ближайшее время LDMOS и GaAs никуда не исчезнут, однако уже сегодня производители GaN рассчитывают на светлое будущее, и, несомненно, основой завтрашнего дня для ВЧ- и СВЧ-техники станет именно GaN. По мере того как технология развивается, процессы совершенствуются, а более широкое распространение снижает издержки, можно ожидать, что GaN станет таким же повсеместным, как и электромагнитные волны, которые он усиливает. ●

ЛИТЕРАТУРА:

1. Combs A. Application Note AN-007: A Comparative Review of GaN, LDMOS, and GaAs for RF and Microwave Applications by.
2. USER MANUAL NUPOWER XTENDER SCISR-20 TRI-BAND BIDIRECTIONAL AMPLIFIER, PART NUMBER: NW-BA-SCISR-20-M02. www.nuwaves.com/wp-content/uploads/NuPower-Xtender-SCISR-20-User-Manual.pdf