

Технология формирования щелевых сквозных металлизированных отверстий к истокам мощных GaN/SiC-транзисторов с высокой подвижностью электронов

© К.Ю. Осипов[†], Л.Э. Великовский*

[†] Научно-исследовательский институт систем электрической связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 634034 Томск, Россия

* ЗАО «Научно-производственная фирма „Микран“», 634045 Томск, Россия

(Получена 27 декабря 2011 г. Принята к печати 13 января 2012 г.)

Исследована технология формирования щелевых сквозных металлизированных отверстий к истокам мощных GaN/SiC-транзисторов с высокой подвижностью электронов. Исследованы зависимости скорости реактивно-ионного травления SiC в разряде с индуктивно-связанной плазмой от давления смеси газов SF₆/O₂/Ar (5–40 мТорр), высокочастотной мощности, подаваемой на нижний электрод (200–300 Вт); соотношения потоков рабочих газов (5 : 1 : (0–10)) и температуры нижнего электрода (5–50 °С). На их основе разработан процесс травления щелевых сквозных отверстий в подложках SiC диаметром 76 мм, с толщинами 50, 100 мкм, характеризующийся гладкой морфологией поверхности травления, высокой скоростью (1 мкм/мин) и низким уровнем высокочастотной мощности, вкладываемой в разряд с индуктивно-связанной плазмой (1000 Вт). Разработанный процесс травления отверстий в подложках SiC характеризуется коэффициентом селективности $S = 12$ и коэффициентом анизотропии травления $A = 13$. В качестве маски для травления сквозных отверстий в подложках SiC рекомендовано использовать пленку на основе NiB. Разработаны процессы формирования металлизации сквозных отверстий с помощью электрохимического осаждения слоев Ni и Au.

1. Введение

При изготовлении СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) на основе GaAs часто возникает необходимость формировать сплошную заземленную металлизацию на обратной стороне пластины, контакт к которой осуществляется через металлизированные сквозные отверстия, формируемые сквозь предварительно утонченную до 100–50 мкм подложку GaAs или InP. В случае усилителей мощности сквозные отверстия можно формировать к истокам транзисторов, при этом металлизация отверстий и обратной стороны пластины выполняет роль теплоотвода, обеспечивающего эффективную передачу тепла радиатору [1]. Заземление истоков транзисторов МИС на основе GaAs через сквозные отверстия технологически хорошо отработано и широко используется в процессе производства [2]. Технология изготовления сквозных металлизированных отверстий для мощных транзисторов на основе гетероструктуры AlGaN/GaN, выращенной на подложках SiC, отработана значительно слабее, что обусловлено недавним появлением приборов данного типа [3], а также трудностями, связанными с высокой химической инертностью материала подложки [4]. В связи с этим работы, направленные на совершенствование данного технологического процесса, интенсивно ведутся во многих лабораториях мира [5–9].

Известны два основных метода получения сквозных отверстий в подложках SiC. Это реактивно-ионное травление в разряде с индуктивно-связанной плазмой

(ИСП) [6] и абляция материала подложки импульсным лазерным излучением [5]. Технология абляции имеет ограничения по формированию отверстий прямоугольной формы, поэтому для получения щелевых отверстий обычно используется реактивно-ионное травление. Согласно данным работы [6], основными проблемами, которые возникают при разработке процесса реактивно-ионного травления сквозных отверстий, являются его низкая скорость и селективность, а также перегрев пластины и образование в ходе травления морфологических дефектов типа „трава“. Данный вид дефектов вызван локальным маскированием поверхности ямы продуктами травления и выражается в появлении на ее дне столбиков непротравленного полупроводникового материала. Авторам работы [6] удалось достичь скорости травления 0.35 мкм/мин при мощности высокочастотного (ВЧ) источника ИСП 750 Вт и 0.5 мкм/мин при мощности 950 Вт. В работе [7] достигнута максимальная на сегодняшний день скорость травления 2 мкм/мин при мощности источника ИСП 2000 Вт. При этом появление морфологических дефектов было минимизировано с помощью оптимизации давления рабочих газов и потока кислорода, подаваемых в камеру. В работах [8,9] была получена скорость травления 1.2–1.3 мкм/мин при ВЧ мощности, вкладываемой в ИСП, равной 2500 Вт. Экспериментально было установлено, что количество дефектов типа „трава“ увеличивается при снижении ВЧ мощности, и показано, что при условии оптимизации остальных параметров процесса можно добиться бездефектного травления и с пониженной мощностью.

[†] E-mail: docar@mail.ru

Целью настоящей работы была разработка технологии изготовления щелевых сквозных металлизированных отверстий в подложках SiC диаметром 76 мм, утонченных до толщины 50 и 100 мкм. При этом особое внимание было уделено исследованию зависимостей скорости травления SiC от основных параметров процесса и установлению возможности получения режима, который обеспечивал бы при бездефектной морфологии дна и стенок отверстия высокую скорость травления (1 мин/мин) при пониженной ВЧ мощности, вкладываемой в разряд ИСП (1000 Вт).

2. Методика эксперимента

В экспериментах использовались пластины 4H-SiC диаметром 76 мм с исходной толщиной 550 мкм. На лицевой стороне пластины методом контактной фотолитографии формировался рисунок контактных площадок истоков мощных транзисторов. Затем на поверхность пластины наносилась металлизация, на тыльной стороне которой происходила остановка травления сквозных отверстий. Металлизация состояла из напыленных методом электронно-лучевого испарения тонких пленок Ti (толщина 10 нм) и Au (толщина 100 нм), а также нанесенного методом электрохимического осаждения толстого слоя Au (толщина 3 мкм). После этого пластина SiC приклеивалась лицевой стороной вниз на носитель и утончалась до толщины 50 или 100 мкм методом шлифовки абразивными порошками карбида бора.

В качестве материала твердой маски для травления отверстий были исследованы пленки Ni и NiV. Окна в твердой маске Ni и NiV формировались с помощью инфракрасной литографии с совмещением рисунков лицевой и обратной сторон пластины. Травление отверстий в пластине SiC производилось методом реактивно-ионного травления в индуктивно-связанной плазме SF₆/O₂/Ar. Давление газовой смеси в рабочей камере варьировалось от 5 до 40 мТорр, при этом общий расход газов изменялся от 11 до 110 атм·см³/мин. Мощность, подаваемая на нижний электрод, составляла 200 или 300 Вт на частоте 13.56 МГц; мощность источника ИСП была постоянной и составляла 1000 Вт на частоте 2 МГц. Температура нижнего электрода, на котором устанавливалась пластина, изменялась от 5 до 50°С.

После того как отверстия были сформированы, на обратной стороне пластины методом электрохимического осаждения формировались слои Ni и Au общей толщиной 5 мкм. Затем пластина отклеивалась от сапфирового носителя.

Фотографии сколов отверстий делались с помощью метода сканирующей электронной микроскопии. Контроль глубины ямы травления проводился при помощи механического профилометра с точностью ±10 нм. Средняя скорость травления рассчитывалась путем деления глубины ямы на время процесса травления.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Травление отверстий в пластинах SiC

Зависимости средней скорости травления SiC от соотношения потоков рабочих газов, давления в рабочей камере, ВЧ мощности, подаваемой на нижний электрод, и температуры столика представлены на рис. 1. Соотношение потоков газов SF₆:O₂ на всем протяжении последующих экспериментов поддерживалось равным 5:1, мощность, вкладываемая в разряд с ИСП, поддерживалась постоянной и была равна 1000 Вт.

Как видно из данных рис. 1, а, при всех значениях ВЧ мощности, подаваемой на нижний электрод, с уменьшением давления смеси газов скорость травления растет. При ВЧ мощности 200 Вт рост скорости травления происходит медленнее, чем при мощности 300 Вт. Абсолютные значения скорости травления выше в случае большего значения ВЧ мощности. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что процессом, лимитирующим скорость травления, может быть ионно-стимулированная десорбция продуктов реакции или ионно-стимулированные реакции химического травления. Оба этих процесса начинают протекать более интенсивно при снижении давления и при повышении ВЧ мощности, подаваемой на нижний электрод. Увеличение скорости травления, скорее всего, связано с ростом напряжения смещения на подложке SiC, с уменьшением рассеяния ионов при их транспорте в плазме и, как следствие, с увеличением энергии ионов, бомбардирующих поверхность SiC.

Практически во всех экспериментах с рабочим давлением > 5 мТорр было обнаружено появление морфологических дефектов типа „трава“, при этом количество дефектов в режимах с ВЧ мощностью 200 Вт было гораздо большим, чем в режимах с ВЧ мощностью 300 Вт. В режиме с максимальным напряжением смещения на нижнем электроде (давление в рабочей камере 5 мТорр, ВЧ мощность 300 Вт) появления дефектов не наблюдалось. По-видимому, это связано с тем, что переосажденные частицы металла твердой маски, являющиеся причиной появления данного вида дефектов, быстро распыляются высокоэнергетичными ионами и не приводят к микромаскированию поверхности.

Как было показано в [6], добавление в газовую смесь инертного газа может существенно ускорить процесс травления. Ускорение достигается за счет бомбардировки поверхности тяжелыми ионами Ag⁺, образующимися в плазме. Экспериментально полученная в данной работе зависимость скорости травления от соотношения потоков Ar:SF₆ при постоянном потоке O₂ приведена на рис. 1, б. Как видно, при увеличении отношения потоков Ar:SF₆ от 0 до 1 скорость травления SiC увеличивается. В предыдущем эксперименте было показано, что в определенных условиях процессы ионной бомбардировки могут играть доминирующую роль при травлении SiC. Данные настоящего эксперимента подтвердили это предположение. При дальнейшем росте

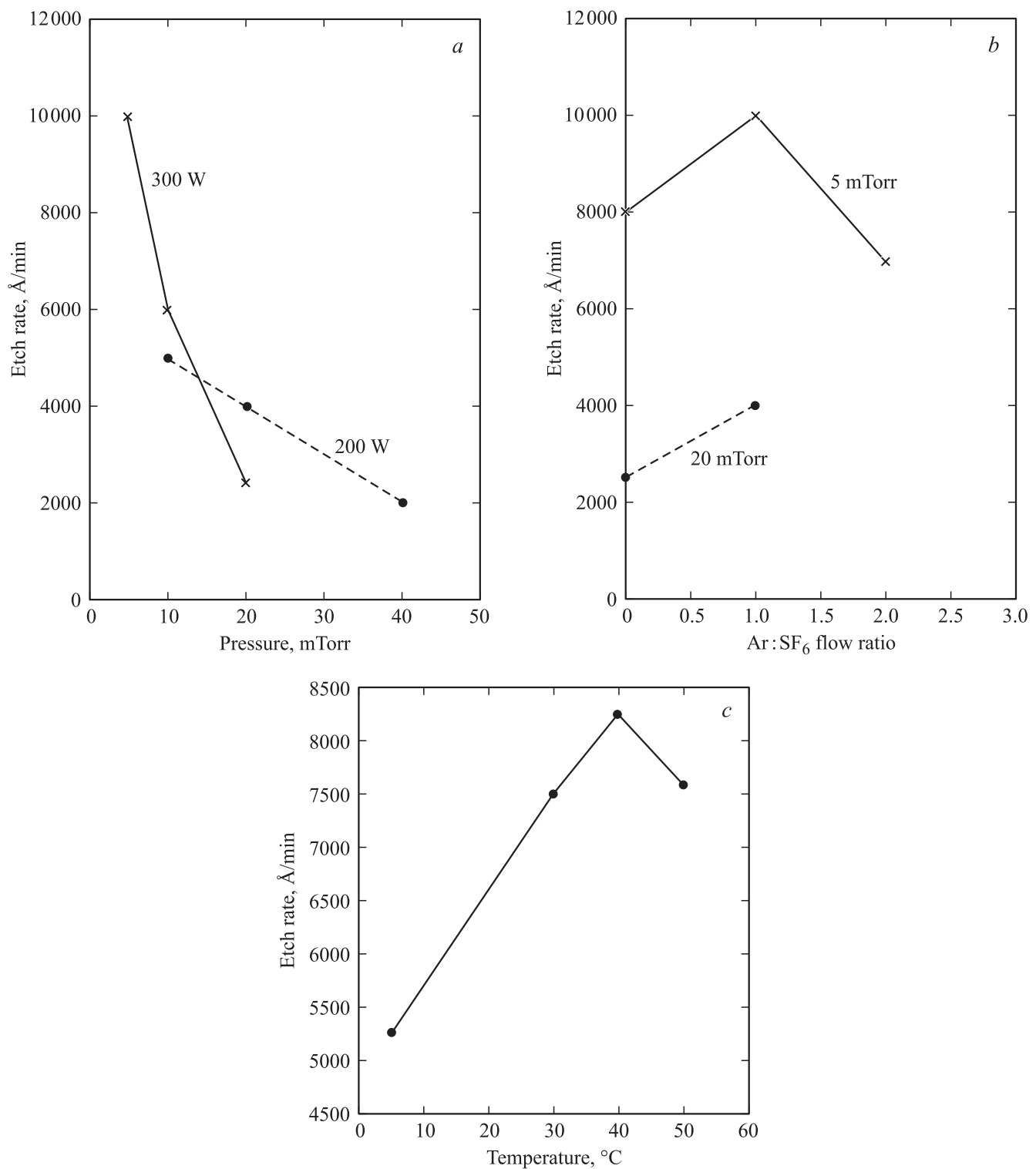


Рис. 1. Экспериментальные зависимости скорости травления карбида кремния от давления газов в рабочей камере при ВЧ мощности, подаваемой на нижний электрод, 200 и 300 Вт (*a*), от соотношения потоков Ar:SF₆ при давлении газов 5 и 20 мТорр (*b*), от температуры столика (*c*).

потока Ar (при отношении потоков более 1 и давлении смеси газов 5 мТорр) скорость травления начинает падать (рис. 1, *b*). Данный факт можно объяснить тем, что при отношении потоков, равном 2, изменяется процесс,

лимитирующий скорость травления. Вследствие того что давление газа в камере поддерживалось постоянным с помощью изменения скорости откачки, увеличение потока Ar приводит к уменьшению концентрации SF₆

в газовой смеси. В результате этого скорость травления начинает лимитироваться концентрацией травящего реагента SF_6 . Наибольшая скорость травления была достигнута при соотношении потоков $Ag : SF_6$, равном 1 : 1.

Добавление Ag в газовую смесь положительно сказалось на морфологии дна отверстия. Так, с ростом доли Ag в газовой смеси концентрация дефектов типа „трава“ уменьшалась, а в режиме травления с максимальным потоком Ag дефекты полностью отсутствовали. Обнаруженная закономерность, по-видимому, обусловлена ростом скорости распыления переосажденных металлических частиц твердой маски тяжелыми ионами Ag^+ .

Из данных, представленных на рис. 1, с, следует, что в температурном диапазоне 5–40°C с ростом температуры нижнего электрода наблюдается практические двукратное увеличение скорости травления. Максимальная скорость травления достигается при температуре нижнего электрода 40°C. Наиболее вероятной причиной наблюдаемой зависимости может быть изменение баланса между скоростями реакций адсорбции химических реагентов и десорбции продуктов реакции травления нижнего электрода, а также увеличение скорости химической реакции по мере роста температуры. Влияния температуры нижнего электрода на морфологию дна и стенок отверстия не обнаружено.

Проведенные эксперименты позволили определить оптимальный режим травления отверстий в подложках SiC , обеспечивающий скорость травления > 1 мкм/мин при ВЧ мощности, вкладываемой в разряд с ИСП, равной 1000 Вт. Параметры режима травления следующие: рабочее давление 5 мТорр; ВЧ мощность, подаваемая на нижний электрод, 300 Вт; температура нижнего электрода 40°C; соотношение потоков $SF_6 : O_2 : Ag$ составляет 5 : 1 : 5. Из анализа литературных данных можно сделать вывод о том, что по сравнению с результатами, полученными ранее в работах [5–9], разработанный процесс характеризуется максимальным отношением (скорость травления) (мощность ИСП). Этот факт можно объяснить более высокой энергией ионов, присущей данному режиму травления.

3.2. Формирование твердой маски для травления отверстий

Известно, что стандартные фоторезистивные маски не могут быть применены для травления глубоких отверстий в подложках SiC , так как рабочая газовая смесь содержит кислород, который быстро удаляет фоторезист [10]. В связи с этим для травления SiC обычно используют твердые маски из металлов, например, никеля [6].

Эксперименты по травлению отверстий на глубину 100 мкм через Ni -маску, проведенные в оптимальном режиме, показали, что селективность процесса травления составляет $S \approx 10$, в то время как в работах [6–9] она была не менее 50. Снижение селективности травления, очевидно, обусловлено повышением энергии ионов, характерным для разработанного процесса.

При толщине Ni -маски 10 мкм наблюдалось ее отслаивание от подложки, что, скорее всего, происходит из-за сильных механических напряжений, возникающих в пленке металла [11]. Для преодоления этой проблемы была исследована возможность использования маски из NiB . Согласно данным работы [11], сплав NiB имеет большую пластичность, чем чистый Ni . Это позволило предположить, что маска на основе NiB может иметь хорошую адгезию к SiC при толщине 10 мкм и более. Экспериментальная проверка показала, что пленка NiB при толщинах ~ 10 мкм действительно не отслаивается от подложки SiC , селективность травления равняется $S = 12$, а маска толщиной 10 мкм пригодна для травления отверстий глубиной 100 мкм.

3.3. Формирование металлизированных щелевых сквозных отверстий в пластинах SiC

В выбранном оптимальном режиме реактивного ионного травления через маску NiB с размером окна 25×100 мкм был реализован процесс травления ще-

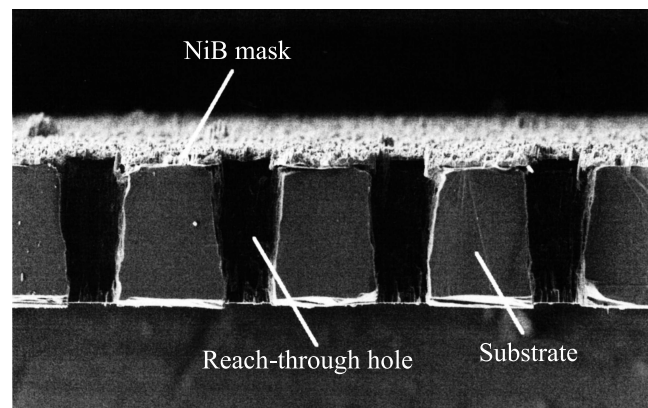


Рис. 2. Щелевые сквозные отверстия в подложке из карбида кремния толщиной 100 мкм.

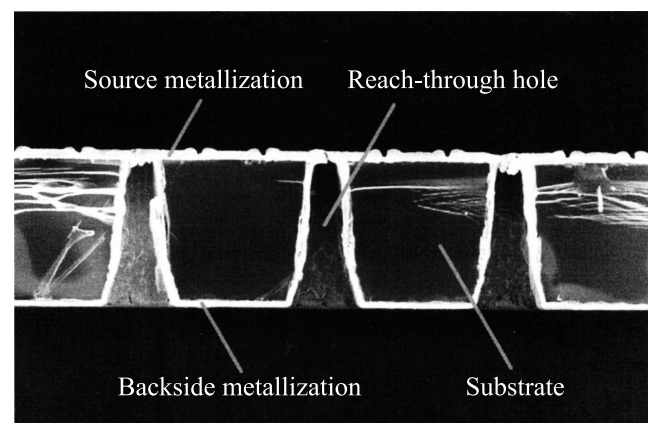


Рис. 3. Фотография металлизированных щелевых сквозных отверстий в пластине карбида кремния толщиной 50 мкм.

левых отверстий в пластине SiC толщиной 100 мкм. Изображение поперечного сечения сформированных щелевых отверстий представлено на рис. 2. Полученные щелевые отверстия имеют небольшой положительный наклон стенок и аспектное соотношение 4. Боковое растравливание отверстий незначительно, коэффициент анизотропии травления равен $A = 13$. На рис. 3 приведено изображение металлизированных щелевых сквозных отверстий в подложке SiC толщиной 50 мкм. Визуальная инспекция и электрическое тестирование показали, что контактные площадки истоков имели надежный электрический контакт с общим заземляющим электродом.

4. Заключение

В работе проведено исследование процесса формирования металлизированных щелевых сквозных отверстий к истокам мощных GaN-транзисторов, изготовленных на подложках SiC диаметром 76 мм, с толщинами 50 и 100 мкм. Исследования показали, что в определенных условиях процесс травления SiC ускоряется при уменьшении давления смеси газов, повышении ВЧ мощности, подаваемой на нижний электрод, а также при оптимизации потока Ar. Рост скорости травления, по-видимому, обусловлен увеличением энергии ионов, бомбардирующих поверхность полупроводника. С использованием полученных данных был разработан процесс травления сквозных отверстий в подложках SiC, обеспечивающий скорость травления > 1 мкм/мин и бездефектную морфологию дна и стенок отверстия при пониженной ВЧ мощности, вкладываемой в разряд с ИСП (1000 Вт). Разработанный процесс травления характеризуется коэффициентом анизотропии травления, равным $A = 13$, и коэффициентом селективности по отношению к маске из NiB, равным $S = 12$.

Авторы работы выражают благодарность коллективу НПК „Микроэлектроника“ ЗАО «НПФ „Микран“» за содействие в проведении экспериментальной части работы.

Список литературы

- [1] C. Cismaru, H. Banbrook, H. Shen, P.J. Zampardi. *Proc. CS MANTECH Conf.* (Palm Springs, USA, 2011).
- [2] *TriQuint 0.35- μ m Power pHEMT 3MI Process Data Sheet.*
- [3] M. Rosker, C. Bozada, H. Dietrich, A. Hung. *Proc. CS MANTECH Conf.* (Tampa, USA, 2009).
- [4] C. Martin. *Proc. CS MANTECH Conf.* (Miami, USA, 2004).
- [5] H. Steiglauer, G. Bödege, D. Öttl, M. Ilgen, H. Blanck, D. Behammer. *Proc. CS MANTECH Conf.* (Tampa, USA, 2009).
- [6] L.F. Voss, K. Ip, S.J. Pearton. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **26** (2), 487 (2008).
- [7] N. Okamoto, T. Ohki, S. Masuda, M. Kanamura. *Proc. CS MANTECH Conf.* (Tampa, USA, 2009).
- [8] J. Ruan, S. Roadman, C. Lee, C. Sellers, M. Regan. *Proc. CS MANTECH Conf.* (Tampa, USA, 2009).
- [9] J. Ruan, S. Roadman, W. Skelton. *Proc. CS MANTECH Cons.* (Portland, USA, 2009).
- [10] E.J.H. Collart, J.A.G. Baggerman, R.J. Visser. *Proc. ISPC-10 Conf.* (Bochum, Germany, 1991) 2.2-21, p. 2.
- [11] A.N. Campbell, A.W. Mullendore, C.R. Hills, J.B. Vander-sande. *J. Mater. Sci.*, **23**, 4049 (1988).

Редактор Л.В. Шаронова

Technology of power CaN/SiC HEMT slot via hole formation

K.Y. Osipov⁺, L.E. Velikovskiy*

⁺ Research Institute of Telecommunications Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634034 Tomsk, Russia

* Research & Production Company „Micran“, 634045 Tomsk, Russia

Abstract Technology of GaN/SiC HEMT slot via hole formation is presented. Basic dependences of SiC etch rate from etch process parameters such as working pressure, RF power, ratio of gas flows SF₆ : O₂ : Ar and temperature of bottom electrode were investigated. Defect-free SiC slot via hole etch process through 2 and 4 mils thick, 3 inch in diameter wafers was developed. The process allowed achieve 1 μ m/min SiC etch rate with inductively coupled plasma source power 1000 W, SiC to NiB mask selectivity $S = 12$ and anisotropy coefficient $A = 13$ were attained. Process of backside Ni/Au metal formation is described.