

©1995 г.

## ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ $6H$ -SiC С ЗАТВОРОМ В ВИДЕ ДИОДА ШОТТКИ

*А.А.Лебедев, М.М.Аникин, А.Н.Кузнецов, М.Г.Растегаева,  
Н.С.Савкина, А.Л.Сыркин, В.Е.Челноков*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской Академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия

(Получена 3 октября 1994 г. Принята к печати 10 октября 1994 г.)

На основе эпитаксиальных слоев  $6H$ -SiC, выращенных сублимационной эпитаксией, получен полевой транзистор с затвором Шоттки (MESFET). Проведены исследования параметров прибора для разных уровней легирования канала в диапазоне температур (300–700) К. Показано, что оптимизация разработанной технологии может привести к существенному улучшению достигнутых рабочих параметров прибора.

### Введение

Полевой транзистор с затвором Шоттки (MESFET) был впервые реализован на основе кремния [1,2]. Успехи в развитии технологии роста карбида кремния позволили в последние годы сформировать приборы данного типа на  $3C$ -SiC [3,4] и  $6H$ -SiC [5–7]. Авторы работ [3–7] использовали эпитаксиальные слои карбида кремния, полученные газотранспортной эпитаксией (CVD). В данной работе использовались слои  $6H$ -SiC, полученные сублимационной эпитаксией в открытой ротовой системе [8] на основе подложек Лэли [9]. Это объясняется тем, что такие слои по ряду параметров (концентрация дислокаций, подвижность носителей) превосходят эпитаксиальные слои, полученные методом CVD.

### Технология

Способ изготовления транзисторов опирался на два ранее проведенных исследования приборов, созданных на основе слоев SiC, полученных методом сублимационной эпитаксии:

- изготовление и исследование транзистора с затвором в виде  $p$ - $n$ -перехода (JFET) [10];
- разработка технологии формирования качественных диодов Шоттки [11].

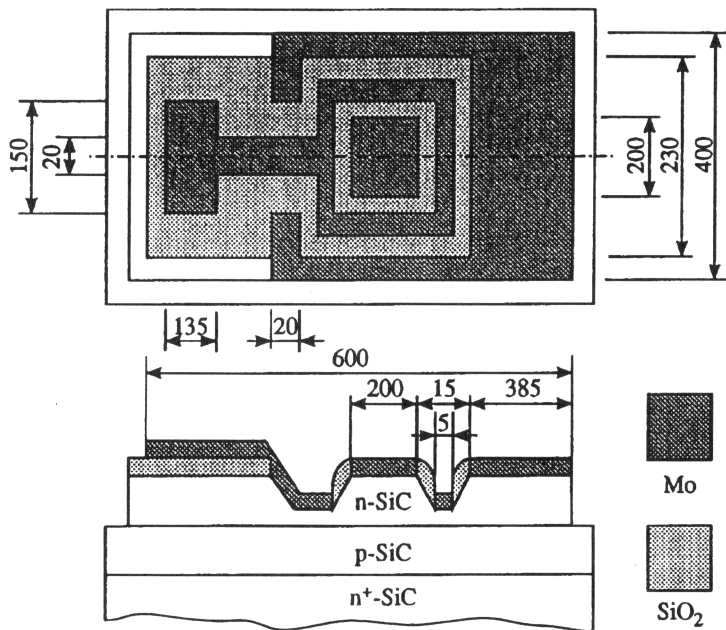


Рис. 1. Транзистор с барьером Шоттки в качестве затвора. Размеры указаны в микронах.

В разработанной структуре MESFET изоляция  $n$ -канала от  $n^+$ -подложки проводилась посредством  $p$ - $n$ -перехода. В качестве материала омических и барьерных контактов использовался молибден. При получении омических контактов для уменьшения сопротивления после напыления металла проводился отжиг структуры при высоких температурах в вакууме. Перед формированием барьерного контакта поверхность структуры обрабатывалась в органических растворителях и напыление металла проводилось при комнатной температуре (без последующего отжига). Изоляция контактной площадки от поверхности полупроводника осуществлялась слоем  $\text{SiO}_2$ , который напылялся методом магнетронного распыления кремниевой мишени в атмосфере кислорода. Формирование дискретных меза-структур и оптимизация глубины канала транзистора осуществлялась ионно-плазменным травлением в  $\text{SF}_6$ . Глубина канала считалась оптимальной, когда запирающее напряжение составляло (10–15) В. После проведения всех технологических операций транзистор имел общий размер  $400 \times 600 \text{ мкм}^2$  и размеры канала — ширину 800 мкм, глубину (0.1–0.2) мкм, длину 5 мкм (рис. 1).

*Параметры прибора и их температурные зависимости.* На рис. 2 представлена схема транзистора. В зависимости от подключения электродов данный прибор может работать в следующих режимах:

- 1) MESFET,
- 2) JFET,
- 3) биполярный транзистор с коллектором в виде диода Шоттки.

В данной работе мы будем рассматривать только первый из возможных рабочих режимов прибора. Разработанный транзистор имел (при комнатной температуре) приведенную крутизну порядка

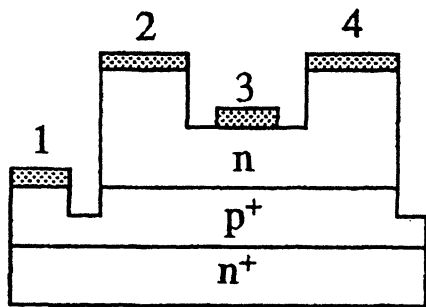


Рис. 2. Схематический вертикальный разрез транзистора. Подключение электродов транзистора при работе в режимах: JFET, исток — 2, 3, сток — 4, затвор — 1; MESFET, исток — 1, 2, сток — 4, затвор — 3; биполярного транзистора с коллектором в виде диода Шоттки, эмиттер — 1, база — 2, 4, коллектор — 3.

4 мСим/мм, напряжение пробоя (20–30) В, максимальный ток насыщения (10–15) мА, граничную частоту более (3–5) МГц. Проведенные температурные исследования показали, что MESFET сохранял работоспособность до температур порядка 600 К. При дальнейшем нагреве быстро возрастали токи утечки барьера, и при  $T \approx 700$  К барьер превращался в нелинейный омический контакт. Охлаждение не приводило к восстановлению выпрямляющих свойств барьера. Удаление металла и вторичное формирование диода Шоттки полностью восстанавливало параметры транзистора. С увеличением температуры до 600 К, запирающее напряжение транзистора плавно возрастало на (2–3) В (рис. 3). Очевидно, это было связано с уменьшением высоты барьера затвора и контактной разности потенциалов изолирующего перехода.

Ток насыщения транзистора  $J_s$  имел немонотонную температурную зависимость. Сначала, до температуры (340–450) К, в зависимости от степени легирования канала наблюдалось увеличение  $J_s$ , затем проводимость канала уменьшалась так, что ток насыщения изменялся по закону  $J_s \sim T^{-2.4}$  (рис. 4). Наблюдавшаяся экспериментальная зависимость объясняется тем, что проводимость 6H-SiC определяется двумя процессами. Во-первых, из-за значительной энергии ионизации основных донорных уровней в 6H-SiC (0.1 и 0.15 эВ) [12] их полная ионизация не наступает при комнатной температуре. Поэтому нагрев структуры приводит к увеличению концентрации электронов в канале и, следовательно, к увеличению его проводимости. Во-вторых, температурная зависимость  $J_s$  определяется температурной зависимостью подвиж-

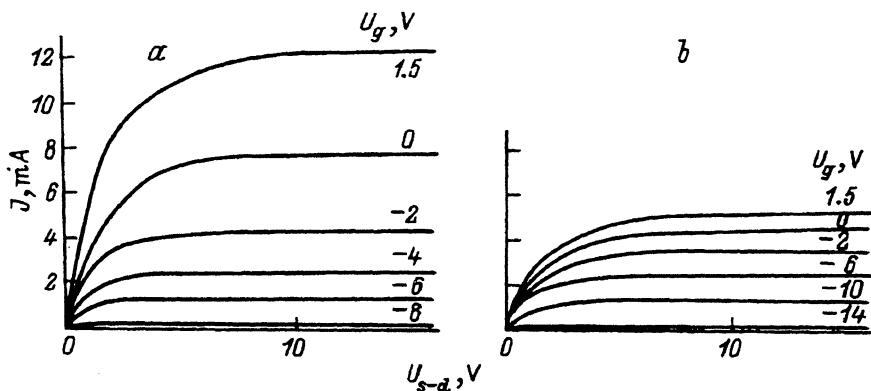


Рис. 3. Зависимости тока стока  $J$  от напряжения сток-исток  $U_{s-d}$  для разных напряжений на затворе  $U_g$  при температурах  $T$ , К: а — 300, б — 620.

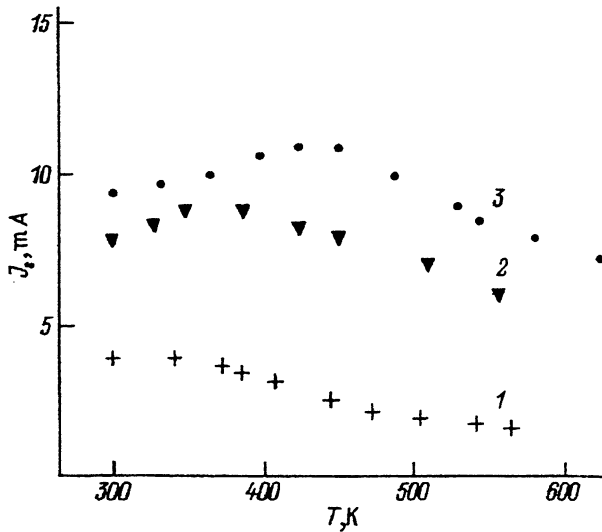


Рис. 4. Температурные зависимости тока насыщения транзистора  $J_s$  для концентраций нескомпенсированных доноров в канале  $(N_d - N_a)$ ,  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ : 1 — 8.4, 2 — 20, 3 — 30.

ности электронов  $\mu_n$ . Согласно [13], при температурах больше 250 К величина  $\mu_n$  в 6H-SiC изменяется пропорционально  $T^{-2.4}$ . Таким образом, в области высоких температур, когда донорные уровни в канале транзистора уже практически полностью ионизованы, температурная зависимость  $J_s$  полностью определяется температурной зависимостью подвижности.

С увеличением легирования канала уменьшается степень ионизации доноров при комнатной температуре и, соответственно, максимум проводимости канала смещается в область высоких температур. Аппроксимируя зависимость  $J_s \sim T^{-2.4}$  к комнатной температуре, можно получить теоретическое значение тока насыщения  $J_s^{\text{th}}$ , т.е. значение, которое имел бы  $J_s$  в случае, если бы все доноры были уже ионизованы. Из соотношения  $J_s/J_s^{\text{th}}$  можно оценить степень ионизации доноров в канале при низких температурах  $k$  [14]. Согласно нашим данным, величина  $k$  при  $T = 300 \text{ К}$  изменялась в слоях 6H-SiC от 0.4 (при  $N_d - N_a = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) до 0.6 (при  $N_d - N_a = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ).

В работе [15] указывалось, что благодаря высоким напряжениям пробоя в 6H-SiC оптимальный уровень легирования канала транзистора составляет  $(1 \div 3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Проведенные нами измерения позволяют заключить, что максимальная проводимость канала (максимальная величина  $J_s$  при постоянном напряжении на затворе и стоке) такого транзистора будет достигаться при  $T \simeq 500 \text{ К}$ .

Сравнение параметров разработанного нами транзистора с последними литературными данными [5-7] показывает преимущество последних. Однако эти результаты были достигнуты при существенно меньшей длине каналов  $L$ . Так, рекордное значение приведенной крутизны транзистора,  $g = 25 \text{ мСим/мм}$  [5], получено для  $L = 0.6 \text{ мкм}$  (при приблизительно такой же глубине канала и степени его легирования,

как в данной работе). Поэтому для более полного сравнения качества использовавшихся эпитаксиальных слоев (главным образом величины  $\mu_n$ ) следует привести параметры транзисторов к одинаковым геометрическим размерам. Поскольку  $g \sim L^{-1}$  нетрудно получить, что MESFET, изготовленный на основе материала, аналогичного использовавшемуся в [5], при длине канала 5 мкм имел бы крутизну приблизительно 3 мСим/мм, т.е. более худшую, чем достигнуто в данной работе. Это подтверждает тот факт, что по своему качеству слои SiC, полученные методом сублимационной эпитаксии, превосходят слои, полученные методом CVD. Таким образом, очевидно, что при использовании сублимационной эпитаксии для создания субмикронных каналов на основе SiC могут быть получены полевые транзисторы с параметрами, по крайней мере не уступающими лучшим мировым достижениям.

### Заключение

На основе 6H-SiC, полученного сублимационной эпитаксией, сформирован MESFET, работоспособный до температур порядка 600 К. Показано, что оптимизация технологии может привести к созданию на основе таких эпитаксиальных пленок транзистора, по своим параметрам находящегося на уровне лучших мировых аналогов. Оптимальные рабочие температуры для MESFET на основе 6H-SiC (с точки зрения максимальной проводимости канала) лежат в диапазоне (350–500) К в зависимости от степени легирования канала.

Часть работы выполнена при поддержке Министерства обороны США.

### Список литературы

- [1] C.A. Mead. Proc. IEEE, **54**, 307 (1966).
- [2] W.W. Hooper, W.I. Lehner. Proc. IEEE, **55**, 1237 (1967).
- [3] H.S. Kong, J.W. Palmer, J.T. Glass, R.F. Davis. Appl. Phys. Lett., **51**, 442 (1987).
- [4] H. Diamon, M. Yamanaka, M. Shinohara, E. Sakuma, S. Misawa, K. Endo. Appl. Phys. Lett., **51**, 2106 (1987).
- [5] J.W. Palmor, J.A. Edmond, H.S. Kong, C.H. Carter Jr. Physica B, **185**, 461 (1993).
- [6] M.W. Shin, G.L. Bilbro, R.S. Trew. Inst. Phys. Conf. Ser., N 137, Ch. 6, 641 (1993).
- [7] S. Тyc, C. Arnodo. Inst. Phys. Conf. Ser., N 137, Ch. 6, 671 (1993).
- [8] M.M. Anikin, P.A. Ivanov, A.A. Lebedev, S.N. Pyatko, A.M. Strel'chuk, A.L. Syrkin. In: *Semiconductor Interfaces and Microstructures*, ed. by Z.C. Feng (World Scientific, 1992) p. 280.
- [9] J.A. Lely. Ber. Dt. Keram. Ges., **32**, 229 (1955).
- [10] М.М. Аникин, П.А. Иванов, А.Л. Сыркин, Б.В. Паренков, В.Е. Челноков. Письма ЖТФ, **15**, 636 (1991).
- [11] М.М. Аникин, А.Н. Андреев, А.А. Лебедев, С.Н. Пятко, М.Г. Растегаева, Н.С. Савкина, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков. ФТП, **25**, 328 (1991).
- [12] S.H. Hagen, A.W.C. van Kemanage, J.W.C. van der Does de Bye. J. Luminecs., **8**, 18 (1973).
- [13] D.L. Barrett, R.B. Campbell. J. Appl. Phys., **38**, 53 (1967).
- [14] A.A. Lebedev, M.M. Anikin, M.G. Rastegaeva, N.S. Savkina, A.M. Strel'chuk, V.E. Chelnokov. In: *Thin Films*, ed. by G. Hecht, F. Richter, J. Hahn (Verlag, Germany, 1994) p. 554 (*Proc. Joint Conf. TAFT'94 and HVIFF*, Dresden, March 7–11, 1994).
- [15] П.А. Иванов, Б.В. Паренков. ФТП, **25**, 1913 (1991).

## 6H-SiC field effect transistor with Schottky-diode gate

*A.A. Lebedev, M.M. Anikin, A.N. Kuznetsov, M.G. Rastegaeva, N.S. Savkina, A.L. Syrkin, V.E. Chelnokov*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

Field effect transistor with Schottky gate (MESFET) was made on base of the 6H-SiC epilayers grown by sublimation epitaxy. The device parameters for different doping levels of the channel were investigated within the temperature range 300–700 K. It has been shown that optimization of the technology developed can significantly improve the device working parameters.

---