

УДК 537.9

МОП-ТРАНЗИСТОРЫ СО ВСТРОЕННЫМ *N*-КАНАЛОМ НА ОСНОВЕ 4H-SiC: ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПОД ЗАТВОРОМ

П. А. Иванов¹, А. С. Потапов¹, С. Б. Рыбалка², А. А. Малаханов²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

²Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7

Статья поступила в редакцию 7 июня 2017 г.

Аннотация. Теоретически рассматривается вопрос о пространственной локализации свободных электронов под затвором нормально закрытых 4H-SiC МОП-транзисторов со встроенным *n*-каналом. Сравниваются транзисторы, в которых канальный *n*-слой исходно перекрыт областью пространственного заряда 1) p^+ -*n*-перехода и 2) МОП-затвора. Проведенный анализ показал, что более широкого пространственного распределения свободных электронов под затвором можно добиться во втором случае. Это должно давать таким транзисторам преимущество по эффективной подвижности электронов в проводящем канале.

Ключевые слова: карбид кремния, МОП-транзисторы, p^+ -*n*-переход, подвижность электронов.

Abstract. The spatial distributions of free electrons under the gate of normally closed 4H-SiC MOS transistors with accumulation-type *n*-channel (ACCUFETs) have been theoretically calculated. Two types of ACCUFETs are compared in which the *n*-channel is initially pinched-off by the depletion region of the p^+ -*n*-junction's or MOS-gate. It has been shown that the wider spatial distribution is realized in the second case. From the point of view of effective mobility of electrons, transistors of the second type has to be superior to the first one. In this case it is possible to expect that the effective mobility of electrons in the conductive channel will approach to mobility in the bulk. It must be admitted that the regulation of threshold voltage of

such transistors is limited to possibility of the choice of metals with the necessary work functions. In addition, the charged traps in oxide and at the oxide-semiconductor interface maybe have a strong effect on threshold voltage of such transistors.

Key words: silicon carbide, MOS transistors, $p^+ - n$ -junction, electron mobility.

1. Введение

В настоящее время в мире разрабатываются силовые МОП-транзисторы разных типов на основе карбида кремния (4H-SiC). Интерес к мощным высоковольтным МОП-транзисторам на основе 4H-SiC обусловлен тем, что такие транзисторы, блокирующие напряжение свыше 1 кВ, должны превосходить по параметрам аналогичные кремниевые МОП-транзисторы [1,2]. Пока наибольшее внимание уделялось транзисторам с инверсионным n -каналом [3,4]. В транзисторах этого типа рекордная подвижность электронов в приповерхностном инверсионном канале не превышает $100 \text{ см}^2/\text{В}$ [5], что почти на порядок ниже по сравнению с объемной подвижностью электронов в 4H-SiC. Альтернативой МОП-транзисторам с инверсионным n -каналом могут быть нормально закрытые МОП-транзисторы со встроенным n -каналом [6]. Считается, что в них подвижность электронов может быть выше за счет того, что электроны во встроенном канале пространственно отделены от поверхности.

Конструкция планарного 4H-SiC МОП-транзистора со встроенным n -каналом показана на рис. 1. Основу структуры составляет подложка p -типа с выращенным на ней эпитаксиальным n -слоем. Истоковая и стоковая p^+ -области сформированы ионной имплантацией. Между ними сформирована МОП-структура. Для того, чтобы обеспечить нормально закрытый режим работы транзистора, толщина и уровень легирования встроенной n -области подбираются так, чтобы при нулевом смещении МОП-затвора n -область была полностью перекрыта областью пространственного заряда (ОПЗ) p - n -перехода

или МОП-затвора. При подаче на МОП-затвор положительного потенциала в n -области создается проводящий канал из свободных электронов.

В настоящей работе теоретически рассматривается вопрос о пространственной локализации свободных электронов в 4H-SiC МОП-транзисторах со встроенным каналом.

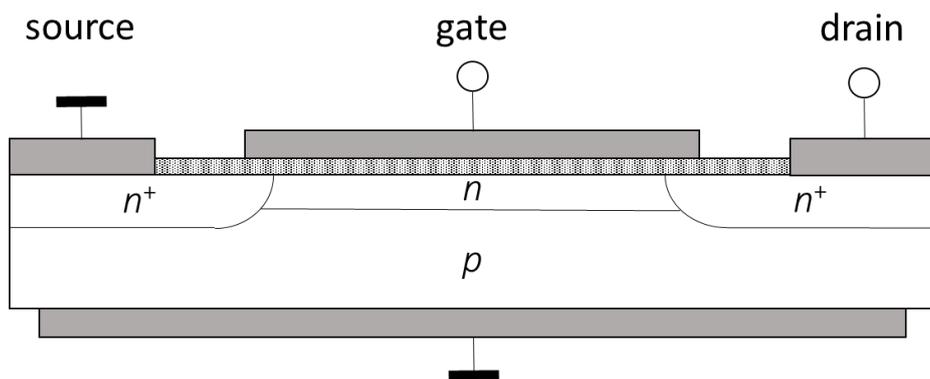


Рис. 1. Базовая конструкция планарного МОП-транзистора со встроенным n -каналом.

Задачей нижеследующего теоретического анализа является определение 1) зависимости полного числа электронов на единицу площади проводящего канала от их поверхностной концентрации и 2) зависимости среднего расстояния, на котором электроны локализованы от границы раздела $\text{SiO}_2/4\text{H-SiC}$, от их полного числа на единицу площади (для разных параметров полупроводниковой структуры).

2. Анализ и обсуждение результатов

На рис. 2 показана энергетическая диаграмма p - n -структуры, в которой положительным потенциалом затвора создан обогащенный слой у поверхности n -области. Примем потенциал ψ в квазинейтральной части n -области (на рис. 2 не показана) равным нулю и будем отсчитывать координату x от поверхности n -области вглубь полупроводника. Тогда потенциальная энергия свободного электрона

$$E_c = E_{cn} - q\psi \quad (1)$$

где E_{cn} - энергия свободного электрона в квазинейтральной части n -области, q - положительный элементарный заряд. Поверхностный потенциал $\psi(0) = \psi_s > 0$, потенциал $\psi(w_p) = \psi_c < 0$ (w_p - граница ОПЗ в p -области). В пределах n -области ($0 < x < d$) локальная плотность объемного заряда

$$\rho = q(N_D - n) \quad (2)$$

где N_D и n - концентрации доноров и свободных электронов, соответственно. В ОПЗ p -области ($d < x < w_p$) локальная плотность объемного заряда

$$\rho = -qN_A \quad (3)$$

где N_A - концентрация акцепторов.

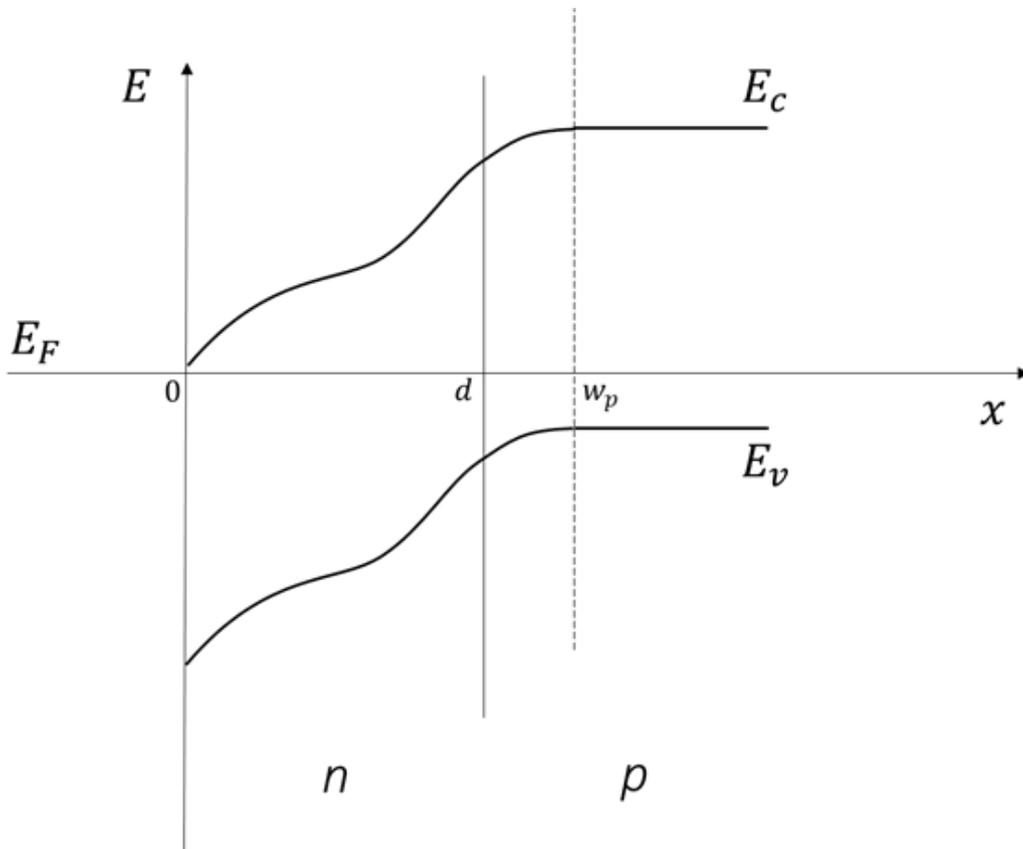


Рис. 2. Зонная диаграмма p - n -структуры с приповерхностным обогащенным n -слоем.

Концентрация свободных электронов в формуле (2) зависит от потенциала ψ и, соответственно, от координаты x . В невырожденном случае концентрация электронов связана с потенциалом ψ распределением Больцмана:

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) = N_c \exp\left(-\frac{E_{cn} - q\psi - E_F}{kT}\right) = N_D \exp\left(\frac{q\psi}{kT}\right) \quad (4)$$

где E_F - уровень Ферми, $N_c = 1.8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ - эффективная плотность состояний в зоне проводимости 4H-SiC, kT - тепловая энергия.

Координатное распределение потенциала $\psi(x)$ описывается уравнением Пуассона:

$$\psi'' = -\frac{\rho}{\varepsilon} = \frac{qN_D}{\varepsilon} \left[\exp\left(\frac{q\psi}{kT}\right) - 1 \right]; 0 < x < d \quad (5)$$

$$\psi'' = -\frac{\rho}{\varepsilon} = \frac{qN_A}{\varepsilon}; d < x < w_p \quad (6)$$

Граничные условия следующие: $\psi(0) = \psi_s$, $\psi(w_p) = \psi_c$ ($\varepsilon = 8.85 \times 10^{-13}$ Ф/см - диэлектрическая проницаемость 4H-SiC). Уравнение (5-6) решалось с помощью комбинации численных методов. Применялся метод Рунге-Кутты, по которому требуется задать в некоторой точке x начальные условия- значения функции ψ и ее производной ψ' . В нашем случае исходно задавался поверхностный потенциал $\psi(0) = \psi_s$ (он определяет поверхностную концентрацию электронов: $n_s = N_D \exp(q\psi_s/kT)$). Производная от потенциала $\psi'(0) = -F_s$ по сути есть поверхностное электрическое поле. Величина F_s задавалась так, чтобы при интегрировании уравнения (5-6) в пределах от $x = 0$ до $x = w_p$ решение на конце интервала интегрирования приходило к $\psi(w_p) = \psi_c$. При этом конец интервала интегрирования ($x = w_p$) определялся как точка, в которой электрическое поле обращается в ноль: $F(w_p) = -\psi'(w_p) \rightarrow 0$. По ходу численного интегрирования определялись полное число свободных электронов в n -области на единицу площади

$$\frac{Q_n}{q} = \int_0^d n(x) dx \quad (7)$$

и среднее расстояние, на котором электроны локализованы от границы раздела SiO₂/4H-SiC

$$r_n = \frac{\int_0^d n(x)x dx}{\int_0^d n(x) dx} \quad (8)$$

При расчетах поверхностный потенциал ψ_s ограничивался величиной $\psi_{smax} = kT \ln(n_{smax}/n_o)$, где $n_{smax} = n^+ \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ - концентрация электронов в

истоковой (инжектирующей) n^+ -области (см. рис. 1). Потенциал ψ_c (встроенный потенциал 4H-SiC p - n -перехода) принимался равным -2.8 В.

Далее рассматриваются следующие варианты структуры транзистора со встроенным каналом: 1) структура с асимметричным p^+ - n -переходом (обеднение областью пространственного заряда p^+ - n -перехода), 2) структура с асимметричным p^- - n -переходом (обеднение областью пространственного заряда МОП-структуры). Если специально не оговорено, МОП-структура считается идеальной: зарядовые состояния в окисле и на границе раздела отсутствуют, а напряжение плоских зон зависит только от разности работ выхода металла и полупроводника. Выберем $N_A = 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ из тех соображений, чтобы величина N_A была приблизительно на порядок выше уровня легирования блокирующей области n -типа в высоковольтных транзисторах вертикальной конфигурации (обычно он составляет $(2-5) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

Максимальная толщина n -области, которая может быть перекрыта областью пространственного заряда резкого p - n -перехода

$$d_{max} = \frac{W_{p-n}}{1 + \frac{N_D}{N_A}}; W_{p-n} = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{p-n}(N_D + N_A)}{qN_D N_A}} \quad (9)$$

Выберем для структуры с p^+ - n -переходом $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При $V_{p-n} = -\psi_c = 2.8 \text{ В}$ толщина $d_{max} = 0.75 \text{ мкм}$.

Максимальная толщина n -области, которая может быть перекрыта областью пространственного заряда МОП-структуры

$$d_{max} = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{MOS}}{qN_D}} + \frac{W_{p-n}}{1 + \frac{N_D}{N_A}} \quad (10)$$

где V_{MOS} - падение напряжения на приповерхностной ОПЗ полупроводника при нулевом смещении МОП-затвора. Для структуры с p^- - n -переходом выберем $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Чем выше уровень легирования, тем выше будет поверхностная плотность электронов в n -области при плоских зонах (то есть без обогащенного слоя). А чем выше эта величина, тем больший вклад в проводимость n -канала будет вносить квазинейтральная часть n -области, в которой электроны

распределены *однородно*. В дальнейших расчетах положим $V_{MOS} = 1$ В. Тогда толщина $d_{max} = 0.28$ мкм.

На рис. 3 для двух типов структур показаны рассчитанные зависимости $Q_n/q(n_s)$. Как видно, при фиксированной поверхностной концентрации свободных электронов наибольшее их полное число на единицу площади должно быть в структуре с p^-n -переходом. Этот результат совершенно очевиден, поскольку в данной структуре даже при отсутствии обогащения (при плоских зонах в полупроводнике) проводимость обеспечивается квазинейтральной областью. Напротив, в структуре с p^+n -переходом вся n -область, за исключением приповерхностного обогащенного слоя, остается обедненной.

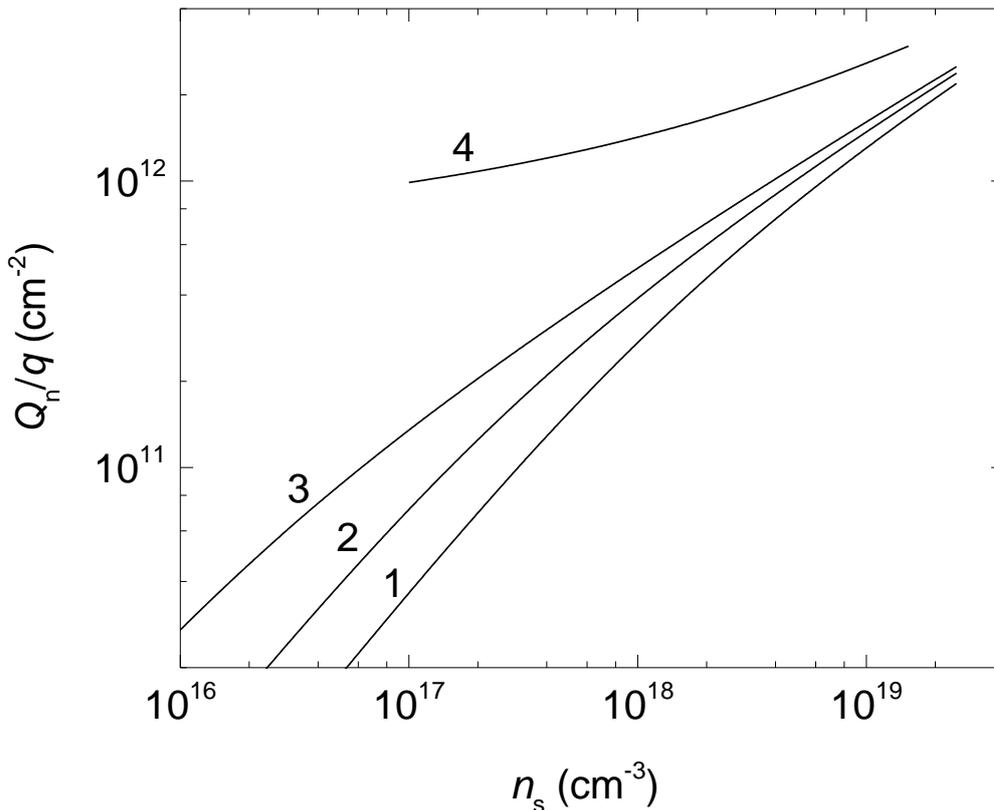


Рис. 3. Зависимости $Q_n/q(n_s)$. Кривые 1 - 3: $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$; кривая 4: $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Толщина n -области d (мкм): 1 - 0.3, 2 - 0.5, 3 - 0.7, 4 - 0.2.

Результаты расчетов зависимостей $r_n(Q_n/q)$ для двух типов структур показаны на рис. 4. Как видно, во всех структурах среднее расстояние

локализации электронов от поверхности сокращается при увеличении их поверхностной плотности. Для структуры с p^+n -переходом расчеты предсказывают сужение пространственного распределения свободных электронов (при фиксированной величине Q_n/q) при уменьшении толщины n -области. Это объясняется тем, что электрическое поле, создаваемое p^+n -переходом в n -области, дополнительно "поджимает" свободные электроны к поверхности (чем тоньше n -область, тем выше величина этого поля).

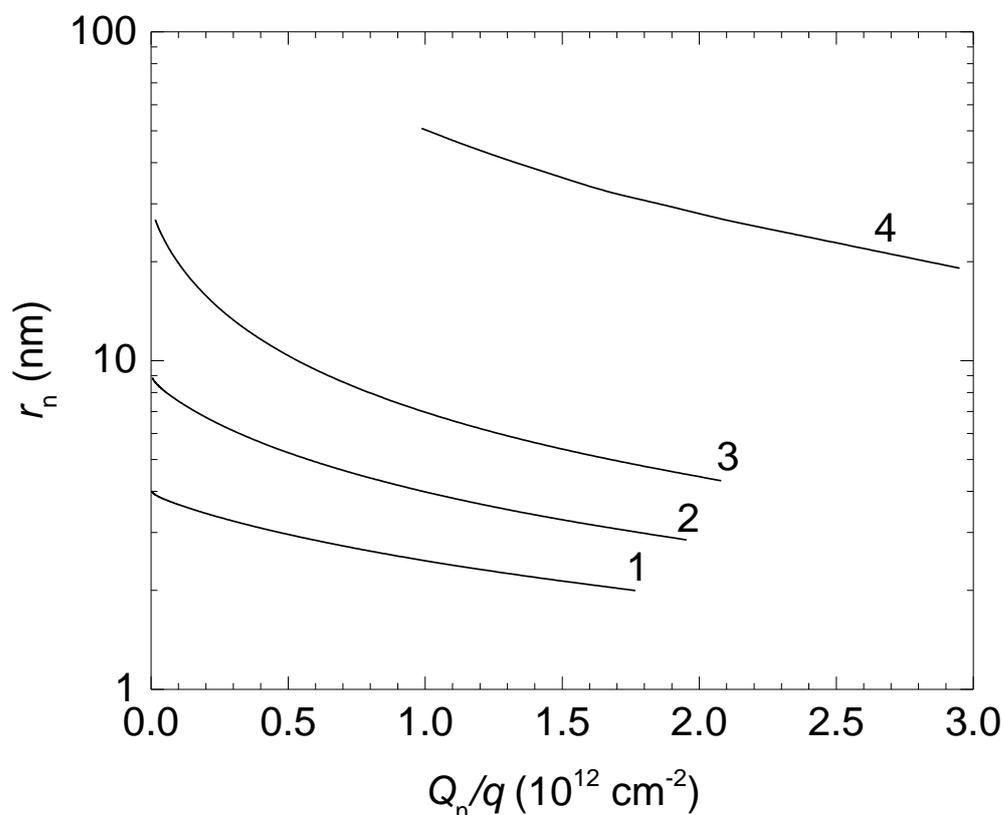


Рис. 4. Зависимости $r_n(Q_n/q)$. Кривые 1 - 3: $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$; кривая 4: $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Толщина n -области d (мкм): 1 - 0.3, 2 - 0.5, 3 - 0.7, 4 - 0.2.

В оптимально подобранной структуре с p^-n -переходом толщина r_n может быть до двадцати раз больше по двум причинам: 1) проводимость n -канала частично обеспечена квазинейтральной частью n -области и 2) в объеме n -области отсутствует электрическое поле, которое дополнительно могло бы повлиять на профиль распределения носителей в обогащенном слое.

3. Выводы

Проведенный анализ показал, что наиболее широкого пространственного распределения свободных электронов в 4H-SiC МОП-транзисторах с обогащенным каналом можно добиться при условии, если встроенная n -область исходно перекрыта областью пространственного заряда МОП-затвора, а не p - n -перехода. В этом случае можно ожидать, что эффективная подвижность электронов в проводящем канале будет приближаться к объемной подвижности. Однако, важно иметь в виду, что регулирование порогового напряжения таких транзисторов ограничивается возможностью выбора металлов с нужными работами выхода (в транзисторах с инверсным каналом пороговое напряжение задается шириной запрещенной зоны 4H-SiC). Кроме того, на пороговое напряжение таких транзисторов сильное влияние могут оказывать заряженные ловушки в окисле и на границе раздела окисел-полупроводник [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (в рамках комплексного проекта 02.G25.31.0201).

Литература

1. Baliga B.J. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. N.Y., Springer Science. 2008. 1069 p.
2. Bhatnagar M., Baliga B.J. *IEEE Trans. Electr. Dev.*, 1993, Vol. 40, pp. 645–655.
3. J.W. Palmour, J.A. Edmond, H.S. Kong, C.H. Carter, Jr., "6H-Silicon Carbide Power Devices for Aerospace Applications," Proc. 28th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 'IECEC'1993', Washington, 1993, pp. 1249–1254.
4. Shenoy J.N., Cooper J.A., Jr., Melloch M.R. *IEEE Electr. Dev. Lett.*, 1997, Vol. 18, pp. 93–95.
5. Okamoto D., Yano H., Hatayama T., Fuyuki T. *Mater. Sci. Forum*, 2012, Vols. 717–720, pp. 733–738. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.717-720.733.

6. Tan J., Cooper A., Melloch M. R. *IEEE Electr. Dev. Lett.*, 1998, Vol. 19, pp. 487–489.

7. Иванов П.А., Самсонова Т.П., Пантелеев В.Н., Поляков Д.Ю. Исследование глубоких ловушек на интерфейсе SiO₂/6H-SiC методом неравновесного эффекта поля // ФТП. – 2001. – Т. 35, вып.4. – С. 482–488. (Ivanov P.A., Samsonova T.P., Panteleev V.N., Polyakov D.Yu. *Semiconductors*, 2001, Vol. 35, No. 4, pp. 468–473. DOI: 10.1134/1.1365197).

URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/38508>

Ссылка на статью:

П.А.Иванов, А.С.Потапов, С.Б.Рыбалка, А.А.Малаханов. МОП-транзисторы со встроенным *n*-каналом на основе 4H-SiC: пространственная локализация свободных электронов под затвором. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/7/text.pdf>