

О пространственной локализации свободных электронов в n -канальных МОП-транзисторах на основе $4H$ -SiC

© П.А. Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

(Получена 19 октября 2016 г. Принята к печати 8 июня 2017 г.)

Теоретически рассматривается вопрос о пространственной локализации свободных электронов в $4H$ -SiC МОП-транзисторах с обогащенным и инверсным n -каналом. Анализ показал, что в оптимально сконструированных транзисторах с обогащенным каналом среднее расстояние, на котором свободные электроны локализованы от поверхности $4H$ -SiC, может быть на порядок больше по сравнению с транзисторами с инверсным каналом. Это должно давать транзисторам с обогащенным каналом преимущество по эффективной подвижности электронов в проводящем канале.

DOI: 10.21883/FTP.2018.01.45327.8436

1. Введение

В настоящее время в мире проводятся интенсивные работы по созданию элементной базы силовой электроники на основе карбида кремния ($4H$ -SiC). В частности, разрабатываются силовые МОП-транзисторы разных типов, работающие в нормально закрытом режиме. Интерес к мощным высоковольтным МОП-транзисторам на основе $4H$ -SiC обусловлен тем, что такие транзисторы, блокирующие напряжение выше 1 кВ, должны превосходить по параметрам аналогичные кремниевые МОП-транзисторы. В частности, удельное сопротивление $4H$ -SiC MOSFETs в открытом состоянии должно быть меньше за счет значительно меньшей толщины дрейфовой области [1]. Пока наибольшее внимание уделялось транзисторам с инверсным n -каналом. В таких транзисторах с U -образной канавкой (UMOSFETs [2]) и с двойной имплантацией доноров и акцепторов (DMOSFETs [3]) рекордная подвижность электронов в приповерхностном инверсном канале не превышает $100 \text{ см}^2/\text{В}$ [4], что почти на порядок ниже по сравнению с объемной подвижностью электронов в $4H$ -SiC. Низкую подвижность связывают, во-первых, с высокой плотностью поверхностных состояний (ПС) на границе раздела $\text{SiO}_2/4H$ -SiC (наличие ПС с энергиями вблизи дна зоны проводимости приводит к захвату свободных электронов и их кулоновскому рассеянию) и, во-вторых, с шероховатостью поверхности карбида кремния, которая появляется как при травлении канавок, так и при высокотемпературном отжиге имплантированных слоев. Альтернативой МОП-транзисторам с инверсным n -каналом могут быть нормально закрытые МОП-транзисторы с обогащенным n -каналом (так называемые ACCUFETs) [5]. Считается, что в них подвижность электронов может быть выше за счет того, что электроны в приповерхностном обогащенном канале имеют более широкое пространственное распределение по сравнению с инверсным каналом.

В настоящей работе теоретически рассматривается вопрос о пространственной локализации свободных электронов в $4H$ -SiC МОП-транзисторах с обогащенным и инверсным каналом. Обсуждаются полученные количественные результаты и даются некоторые рекомендации по конструированию транзисторов с обогащенным каналом.

2. Базовые конструкции n -канальных МОП-транзисторов на основе $4H$ -SiC

Базовая конструкция $4H$ -SiC МОП-транзистора с обогащенным n -каналом (в планарном исполнении) показана на рис. 1. Основу транзисторной структуры составляет подложка p -типа с выращенным на ней тонким эпитаксиальным n -слоем. Локальные истоковая и стоковая n^+ -области сформированы ионной имплантацией. В промежутке между истоковой и стоковой областями сформирована МОП-структура. Для того чтобы обеспечить нормально закрытый режим работы транзистора, толщина и уровень легирования встроенной n -области подбираются таким образом, чтобы уже при нулевом смещении МОП-затвора она была полностью перекрыта областью пространственного заряда (ОПЗ)

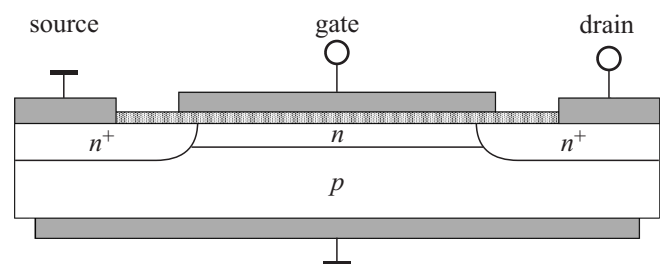


Рис. 1. Базовая конструкция планарного МОП-транзистора с обогащенным n -каналом.

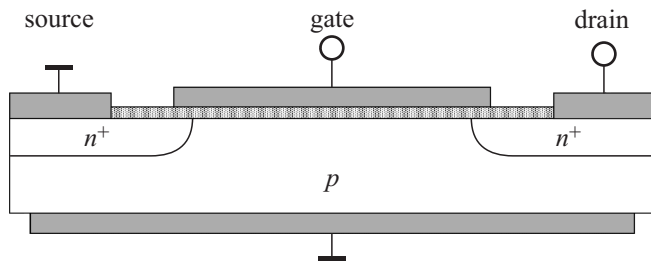


Рис. 2. Базовая конструкция планарного МОП-транзистора с инверсным *n*-каналом.

p-*n*-перехода и(или) МОП-затвора. При подаче на МОП-затвор положительного потенциала достаточной величины в *n*-области создается проводящий канал из свободных электронов.

Планарный 4H-SiC МОП-транзистор с инверсным *n*-каналом (рис. 2) отличается от транзистора с обогащенным *n*-каналом тем, что в нем нет встроенной *n*-области, а проводящий (инверсный) *n*-канал создается у поверхности *p*-области.

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 SiO₂/4H-SiC, от их полного числа на единицу площади (для разных параметров полупроводниковой структуры).

3. Теоретический анализ

3.1. Обогащенный канал

На рис. 3 показана (качественно) энергетическая зонная диаграмма *p*-*n*-структуры, в которой создан обогащенный слой у поверхности *n*-области. Примем электрический потенциал ψ в квазинейтральной части *n*-области (на рис. 3 не показана) равным нулю и будем отсчитывать координату *x* от поверхности *n*-области в глубь полупроводника. Тогда потенциальная энергия свободного электрона

$$E_c = E_{cn} - q\psi, \tag{1}$$

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

$$\rho = q(N_D - n), \tag{2}$$

где N_D и n — концентрации доноров и свободных электронов соответственно. В ОПЗ *p*-области ($d < x < w_p$)

локальная плотность объемного заряда

$$\rho = -qN_A, \tag{3}$$

где N_A — концентрация акцепторов.

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:

$$\begin{aligned} n &= N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) = N_c \exp\left(-\frac{E_{cn} - q\psi - E_F}{kT}\right) \\ &= N_D \exp\left(\frac{q\psi}{kT}\right), \end{aligned} \tag{4}$$

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

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

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

$$\psi'' = -\frac{\rho}{\epsilon} = \frac{qN_A}{\epsilon}; \quad d < x < w_p. \tag{6}$$

Граничные условия следующие: $\psi(0) = \psi_s$, $\psi(w_p) = \psi_c$ ($\epsilon = 8.85 \cdot 10^{-13} \text{ Ф/см}$ — диэлектрическая проницаемость 4H-SiC). Уравнения (5), (6) решались 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

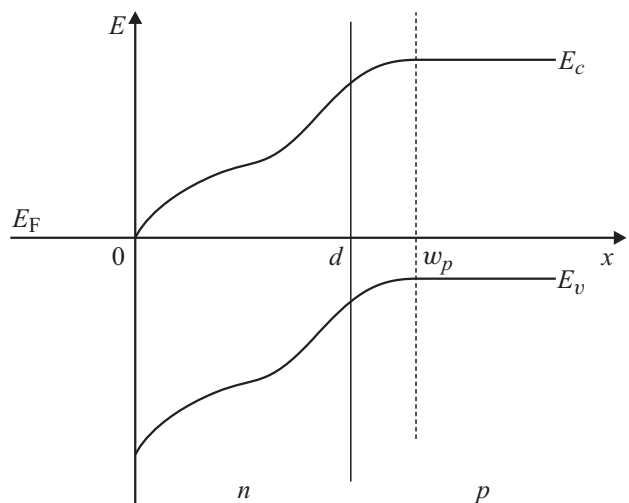


Рис. 3. Зонная диаграмма *p*-*n*-структуры с приповерхностным обогащенным *n*-слоем.

$\psi'(0) = -F_s$ по сути есть поверхностное электрическое поле. Величина F_s задавалась так, чтобы при интегрировании уравнений (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 нуль: $F(w_p) = -\psi'(w_p) \rightarrow 0$. По ходу численного интегрирования определялись полное число свободных электронов в *n*-области на единицу площади

$$Q_n/q = \int_0^d n(x)dx \quad (7)$$

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 $\psi_{smax} = kT \ln(n_{smax}/n_0)$, 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 .

3.2. Инверсный канал

На рис. 4 показана (качественно) энергетическая зонная диаграмма полупроводника *p*-типа, на поверхности которого создан инверсный слой. Примем электрический потенциал ψ в квазинейтральной части *p*-области равным нулю и будем отсчитывать координату x от

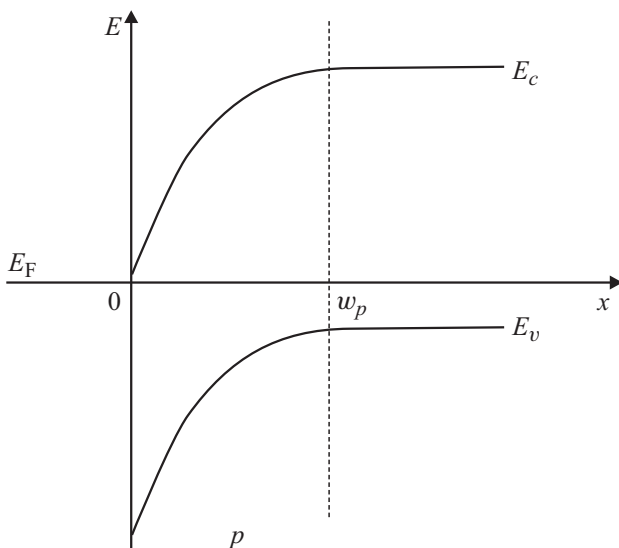


Рис. 4. Зонная диаграмма полупроводника *p*-типа с приповерхностным инверсным *n*-слоем.

поверхности *p*-слоя в глубь полупроводника. Тогда потенциальная энергия свободного электрона

$$E_c = E_{cp} - q\psi = E_{vp} + E_g - q\psi, \quad (9)$$

где E_{cp} и E_{vp} — энергии свободного и валентного электрона в квазинейтральной части *p*-области соответственно; E_g — ширина запрещенной зоны. Концентрация свободных электронов связана с потенциалом ψ распределением Больцмана:

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) = N_c \times \exp\left(-\frac{E_g + E_{vp} - q\psi - E_F}{kT}\right) = N_c \exp\left(\frac{q\psi - q\psi_0}{kT}\right), \quad (10)$$

где $q\psi_0 = E_g - (E_F - E_{vp}) > 0$. В ОПЗ *p*-слоя ($0 < x < w_p$) локальная плотность объемного заряда

$$\rho = -q(N_A + n). \quad (11)$$

В пределах ОПЗ координатное распределение потенциала $\psi(x)$ описывается уравнением Пуассона:

$$\psi'' = -\frac{\rho}{\epsilon} = \frac{qN_A}{\epsilon} \left[1 + \frac{N_c}{N_A} \exp\left(\frac{q\psi - q\psi_0}{kT}\right)\right]. \quad (12)$$

Граничные условия следующие: $\psi(0) = \psi_s$, $\psi(w_p) = 0$. Процедура численного интегрирования уравнения (12) и определения величин (Q_n/q) и r_n описана выше в разд. 3.1.

4. Результаты и обсуждение

Как будет показано далее, в транзисторе с обогащенным каналом пространственное распределение концентрации свободных электронов в пределах *n*-области зависит от того, как обеспечено исходное обеднение последней — со стороны *p*-*n*-перехода или же со стороны МОП-затвора. Далее рассматриваются следующие варианты: 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 $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ 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 $(2-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

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

резкого $p-n$ -перехода,

$$d_{\max} = \frac{W_{p-n}}{1 + \frac{N_D}{N_A}}; \quad W_{p-n} = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{p-n}(N_D + N_A)}{qN_D N_A}}. \quad (13)$$

Выберем для структуры с p^+-n -переходом $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. 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,

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{\text{MOS}}}{qN_D}} + \frac{W_{p-n}}{1 + N_D/N_A}, \quad (14)$$

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 (т.е. 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 $V_{\text{MOS}} = 1 \text{ В}$. Тогда толщина $d_{\max} = 0.28 \text{ мкм}$.

Транзисторы с обогащенным каналом и разной структурой интересно сравнить не только между собой, но и с инверсными транзисторами. Для последних выберем $N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 5 для всех 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. Аналогичная ситуация имеет место и в структуре с инверсным каналом, в которой в проводимость вносит вклад исключительно инверсный слой.

Результаты расчетов зависимостей $r_n(Q_n/q)$ для всех типов структур показаны на рис. 6. 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).

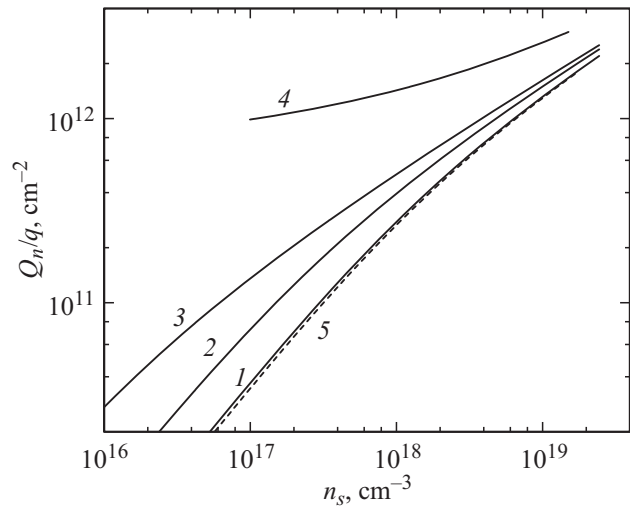


Рис. 5. Зависимости $Q_n/q(n_s)$. 1–3 (обогащенный канал): $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 4 (обогащенный канал): $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 5 (инверсный канал): $N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Толщина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

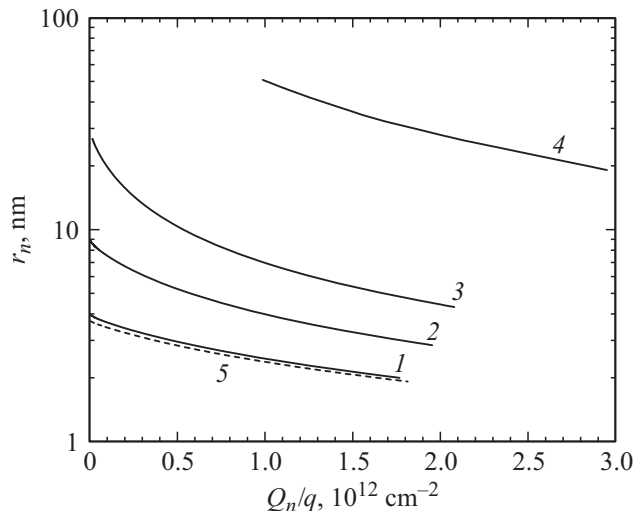


Рис. 6. Зависимости $r_n(Q_n/q)$. 1–3 (обогащенный канал): $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 4 (обогащенный канал): $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 5 (инверсный канал): $N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Толщина n -области d , мкм: 1 — 0.3, 2 — 0.5, 3 — 0.7, 4 — 0.2.

Аналогичная ситуация реализуется в транзисторе с инверсным каналом, в котором на локализацию электронов влияет электрическое поле в объеме p -области. С точки зрения достижения более широкого пространственного распределения электронов в проводящем канале структура с p^+-n -переходом дает незначительное преимущество по сравнению с инверсным каналом и только в том случае, когда $d \sim d_{\max}$. Напротив, оптимально подобранная структура с p^-n -переходом дает большое преимущество. В ней толщина r_n может быть до два-

дцати 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.

5. Заключение

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 [6].

Список литературы

- [1] M. Bhatnagar, B.J. Baliga. IEEE Electron. Dev., **40**, 645 (1993).
- [2] J.W. Palmour, J.A. Edmond, H.S. Kong, C.H. Carter, jr. Proc. 28th Intersociety Energy Conversion Energy Conf. (Atlanta, Georgia, USA (1993).
- [3] J.N. Shenoy, J.A. Cooper, jr., M.R. Melloch. IEEE Electron. Dev. Lett., **18**, 93 (1997).
- [4] D. Okamoto, H. Yano, T. Hatayama, T. Fuyuki. Mater. Sci. Forum, **717–720**, 733 (2012).
- [5] J. Tan, A. Cooper. M.R. Melloch. IEEE Electron. Dev. Lett., **19**, 487 (1998).
- [6] П.А. Иванов, Т.П. Самсонова, В.Н. Пантелеев, Д.Ю. Поляков. ФТП, **35**, 482 (2001).

Редактор Г.А. Оганесян

Spatial distributions of free electrons in 4H-SiC based MOSFETs

P.A. Ivanov

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Spatial distributions of free electrons in 4H-SiC based inversion and accumulation type MOSFETs are calculated and discussed. In optimally designed accumulation type transistors (ACCUFETs), the averaged distance of electron localization away from the surface is one order of magnitude longer than that in inversion type MOSFETs. This can give priority to 4H-SiC ACCUFETs in terms of channel mobility.