

## Широкозонные полупроводники для силовой электроники

© А.А. Лебедев<sup>¶</sup>, В.Е. Челноков

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

(Получена 1 марта 1999 г. Принята к печати 2 марта 1999 г.)

Рассмотрены последние результаты, полученные при разработке силовых приборов на основе широкозонных полупроводников. Показано, что в настоящее время самым перспективным материалом для высокотемпературной, радиационно стойкой силовой электроники остается карбид кремния. Рассмотрены некоторые проблемы, содержащие широкое промышленное внедрение приборов на основе SiC.

В современной физике полупроводников существует два наиболее быстро развивающихся направления: 1) изменение свойств материала за счет изменения геометрических размеров структур, т.е. физика наноструктур; 2) разработка и исследование новых полупроводниковых материалов.

Значительное место в работах по второму направлению занимают исследования широкозонных полупроводников. Потенциальные возможности широкозонных материалов для создания полупроводниковых приборов анализировались достаточно давно [1–3]. Большие, чем у Si и GaAs, величины запрещенных зон давали этим материалам следующие преимущества:

- увеличение области рабочих температур,
- возможность создания на их основе светоизлучающих приборов на видимую область спектра,
- высокие значения критического поля пробоя ( $E_{cr}$ ),
- большая радиационная стойкость.

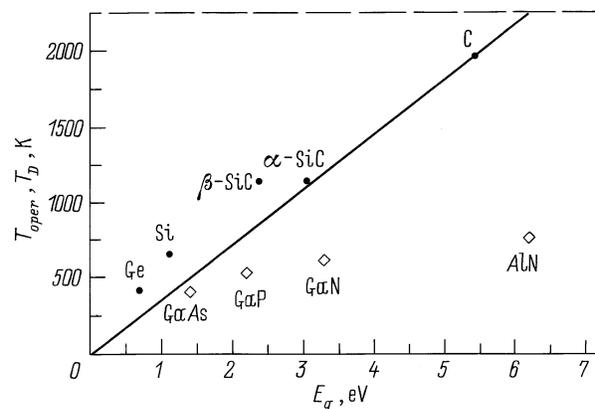
Известно, что для комплексного учета возможностей полупроводникового материала были предложены специальные критерии качества — "figure of merit" (fm), которые рассчитывались исходя из основных физико-химических параметров полупроводника.

Так, Джонсон [1] предложил использовать в качестве критерия качества (JM), определяющего рабочий предел обычного транзистора, произведение величины  $E_{cr}$  и скорости насыщения ( $V_{sat}$ ):  $JM = (E_{cr}V_{sat}/\pi)^2$ . Позже был определен следующий критерий:  $KM = \lambda(V_{sat}/\varepsilon)^{1/2}$  ( $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная полупроводника,  $\lambda$  — теплопроводность), в котором учитывалась скорость переключения транзистора при работе в качестве логического элемента компьютера [4]. В работе [5] Ба-лига предложил еще один критерий (BM) для оценки полупроводникового материала, связанный с потерями при работе мощных полевых транзисторов:  $BM = \mu\varepsilon E_{cr}^3$  ( $\mu$  — подвижность носителей тока). Однако этот критерий был связан в основном с омическими потерями и был применим для оценки возможностей полупроводника с точки зрения низкочастотных приборов. Для оценки высокочастотных приборов также должны быть рассмотрены потери, связанные с переключениями. В работе [6] был предложен критерий:  $VH = \mu E_{cr}^2$ , основанный на

предположении, что при переключениях потери вызваны перезарядной входной емкости прибора. Еще одним важным параметром при отборе материалов для создания мощных приборов, являются термические свойства полупроводника. В работе [7] был предложен критерий качества, учитывающий эти свойства:  $QF_1 = \lambda\mu\varepsilon E_{cr}^3$ .

В табл. 1 представлены литературные данные о средних значениях параметров карбида кремния, необходимые для расчета выше перечисленных критериев качества.

В табл. 2 представлены расчетные относительные значения 5 параметров fm для 6H- и 4H-SiC, Si, GaAs, GaP, GaN, AlN и алмаза. При расчете значения параметров для Si были приняты за единицу. В табл. 2 также указано: является данный полупроводник прямозонным или непрямозонным, а также наличие (+) или отсутствие (–) собственной подложки большого диаметра. Первое обстоятельство во многом определяет применение данного материала для создания оптоэлектронных устройств. Второе — возможности использования полученных научных результатов в промышленном производстве. Как видно из таблиц, по всем рассмотренным критериям карбид кремния превосходит Si, GaAs, GaP. В то же время по ряду параметров SiC уступает GaN, AlN. После создания *p-n*-структур, а затем светодиодов и лазеров на основе GaN [8], этот материал оказался вне



Зависимость температуры Дебая  $T_D$  и максимальной рабочей температуры  $T_{oper}$  от величины запрещенной зоны для некоторых полупроводников.

<sup>¶</sup> E-mail: shura.lebe@pop.ioffe.rssi.ru

Таблица 1. Основные параметры некоторых полупроводников

Материал	Параметр					
	$E_g$ , эВ	$E_{cr}$ , $10^6$ В/см	$V_{sat}$ , $10^7$ см/с	$\lambda$ , Вт/(см·К)	$\mu_p$ , см <sup>2</sup> /(В·с)	$\mu_n$ , см <sup>2</sup> /(В·с)
Si	1.1	0.3	1	1.5	600	1500
GaAs	1.43	0.6	1	0.45	400	8500
GaP	2.2	0.5	1.5	0.7	150	250
4H-SiC	3.2	3	2	4.9	50	1000
GaN	3.45	> 1	2.2	1.3	850	1250
Алмаз	5.45	10	2.7	22	1600	2200
AlN	6.2	?	?	2	14	?

Примечание.  $\mu_p$  и  $\mu_n$  — подвижности дырок и электронов соответственно;  $E_g$  — ширина запрещенной зоны.

Таблица 2. Значение нормализованных критериев качества и ряда других параметров для некоторых полупроводников [1,2]

Материал	JM = $(E_{cr}V_{sat}/\pi)^2$	KM = $\lambda(V_{sat}/\varepsilon)^{1/2}$	BM = $\varepsilon\mu E_{cr}^3$	BH = $\mu E_{cr}^2$	QF <sub>1</sub> = $\lambda\varepsilon\mu E_{cr}^3$	$T_{oper}$ , К	$T_D$ , К	Структура запрещенной зоны	Наличие собст- венной подложки с $\varnothing \geq 1$ дюйма
Si	1	1	1	1	1	410	645	Непрямая	+
GaAs	11	0.45	28	16	9.4	570	344	Непрямая	+
GaP	37	0.73	16	3.8	9.4	800	445	Непрямая	+
6H-SiC	260	5.1	90	13	300	1200	1200	Непрямая	+
4H-SiC	410	5.1	290	34	950	1230	1200	Непрямая	+
GaN	790	1.8	910	100	910	1250	600	Прямая	—
Алмаз	5330	31	14860	1080	198100	2100	1860	Непрямая	—
AlN	5120	2.6	390	14	660	2100	747	Непрямая	—

Примечание.  $T_{oper}$  — рабочая температура,  $T_D$  — температура Дебая.

конкуренции для создания оптоэлектронных устройств на основе широкозонных материалов. GaN также является сильным конкурентом карбиду кремния в области создания полевых транзисторов [9]. Однако для GaN и AlN пока отсутствуют собственные подложки и их рост производится путем гетероэпитаксии с использованием подложек из других материалов, в том числе карбида кремния [6,10]. Это приводит к очень высокой плотности дислокаций в выращиваемых пленках ( $> 10^7$  см<sup>-2</sup>), что пока ограничивает применение этих материалов для создания силовых полупроводниковых устройств. Кроме того, как было показано в работах [1,11], для широкозонных полупроводников наравне с предельной рабочей температурой ( $T_{oper}$ ), которая определяется шириной запрещенной зоны материала, следует рассматривать температуру Дебая ( $T_D$ ), которая определяет предел термической стабильности полупроводника. В случае, если  $T_D < T_{oper}$ , предельное значение рабочих температур снижается. Как видно из рисунка и табл. 2 по соотношению  $T_D$  и  $T_{oper}$  полупроводники GaN и AlN также уступают SiC.

Вне конкуренции как по значениям  $f_m$ , так и по величинам максимальных рабочих температур находится алмаз. Однако пока не удается получать монокристаллических слоев алмаза с использованием гетероэпитаксии, а собственные подложки имеют небольшую площадь и

достаточно дорогостоящие [12]. Кроме того, для алмаза существуют определенные сложности с получением качественных  $p-n$ -структур.

В течение последнего десятилетия высокие потенциальные возможности карбида кремния нашли практическое воплощение. Максимальные значения параметров, полученных для некоторых типов полупроводниковых приборов, представлены в табл. 3. Первыми промышленно выпускаемыми приборами на основе SiC были синие светодиоды. Однако после создания качественных  $p-n$ -структур на основе GaN, этот материал занял лидирующее положение в разработках оптоэлектронных устройств.

Таблица 3. Параметры некоторых приборов на основе SiC

Тип прибора	Параметры и ссылки
Диод Шоттки	$U_{br} = 3$ кВ [3]
Диод	$U_{br} = 5.5$ кВ [14]
Тиристор	$U_s = 700$ В, $I_{max} = 1.5$ А [15]
MESFET	$f_{max} = 40$ ГГц, $W_{max} = 3.3$ Вт [16]
MOSFET	$U_{br} = 2.6$ кВ [17]

Примечание.  $U_{br}$  — максимальное рабочее напряжение,  $U_s$  — напряжение переключения,  $I_{max}$  — максимальный рабочий ток,  $f_{max}$  — максимальная рабочая частота,  $W_{max}$  — максимальная мощность.

В настоящее время существует промышленный выпуск монокристаллических подложек SiC, которые используются как для выращивания собственно SiC, так и для гетероэпитаксии GaN. В отличие от роста на сапфире меньшее рассогласование решетки и более близкие коэффициенты термического расширения позволяют получать на основе SiC более структурно совершенные эпитаксиальные слои GaN [18]. Кроме того, использование проводящей подложки SiC позволяет использовать вертикальную геометрию приборов, что значительно упрощает технологию.

Одной из основных проблем при создании полупроводниковых приборов на основе SiC является низкое качество монокристаллических подложек. Плотность дислокаций в промышленно выпускаемых (CREE Inc., USA) подложках составляет  $10^3$ – $10^5$  см<sup>-2</sup>, кроме того в них присутствуют протяженные микроканалы (micropipes). Наличие подобных дефектов ограничивает рабочую площадь создаваемых приборов. В случае высокочастотных транзисторов этот недостаток не является столь лимитирующим и приборы данного типа на основе SiC могут работать в гигагерцевом диапазоне частот, а по другим своим параметрам уже практически не уступают транзисторам на основе Si и GaAs [16]. В то же время GaN, хотя и не имеет существенных преимуществ с точки зрения напряжения пробоя, подвижности носителей и дрейфовой скорости насыщения, однако позволяет получать на основе твердых растворов AlGaIn–GaN гетероструктуры с двумерным электронным газом. Однако SiC ввиду наличия большого числа политипов также имеет большие потенциальные возможности с точки зрения создания гетероэпитаксиальных структур. Таким образом, пока трудно сказать, какой из широкозонных материалов будет в будущем основным при создании устройств СВЧ диапазона. По оценкам специалистов, к 2000 году полевые транзисторы на основе SiC будут использоваться в промышленно выпускаемой электронике [19].

Для разработки силовых приборов высокая плотность дефектов в подложках и эпитаксиальных слоях SiC пока является одним из основным ограничивающих факторов. Максимальные напряжения пробоя порядка или более 1 кВ, как правило, достигались для *p-n*-структур с диаметром порядка 100 мкм. Малые рабочие площади не позволяли получать на таких приборах значительных величин прямых токов и соответственно их трудно назвать силовыми.

Развитие технологии роста подложек позволяет надеяться, что в будущем удастся существенно снизить плотность дефектов в подложках и получить приборные структуры разумных размеров. Кроме улучшения технологии объемного роста SiC разрабатываются различные альтернативные варианты повышения структурного совершенства подложек. Одним из них является метод обработки подложек жидкофазной эпитаксией [20]. В результате происходит рост буферного слоя и заравнивание имеющихся в подложке дефектов. Так, после обработки

в расплаве, на основе промышленно выпускаемой подложки методом сублимационной эпитаксии был получен эпитаксиальный слой, и сформированные на его основе диоды Шоттки имели напряжение пробоя до 100 В при площади 8 мм<sup>2</sup> [21].

Кроме того следует отметить, что эпитаксиальные слои SiC, полученные методом сублимационной эпитаксии, сами по себе имеют большую термостабильность и радиационную стойкость, чем слои, полученные методом CVD [22,23]. В последнее время [24,25] наметилось возвращение интереса к данному ростовому методу, предложенному в ФТИ им. А.Ф. Иоффе [26] и традиционно использовавшемся здесь. Отметим, что в нашей лаборатории методом сублимационной эпитаксии были получены диодные структуры с напряжением пробоя порядка 500 В при рабочей площади структуры 2 мм<sup>2</sup>.

## Список литературы

- [1] E.O. Jonson. RCA Rev., **26**, 163 (1965).
- [2] А.Е. Отблеск, В.Е. Челноков. *Матер. 11 Зимней школы ФТИ* (Л., ЛИЯФ, 1979) с. 161.
- [3] M.N. Yoder. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-43**, 1633 (1996).
- [4] R.W. Keyes. Proc. IEEE, **60**, 225 (1972).
- [5] B.J. Baliga. J. Appl. Phys., **53**, 1759 (1982).
- [6] R. Gaska, Q. Chen, J. Yang, A. Osinsky, M. Asif Khan, M.S. Shur. IEEE Electron. Dev. Lett., **18**, 492 (1997).
- [7] K. Szenai, R.S. Scott, B.J. Baliga. IEEE Electron. Dev., **10**, 85 (1989).
- [8] S. Nakamura. MRS Bulletin, **22**, 29 (1997).
- [9] M.S. Shur, M.A. Khan. MRS Bulletin, **22**, 44 (1997).
- [10] J.T. Torvik, Qin Chang-Hua, M. Lecsono, J.I. Pankove. Appl. Phys. Lett., **72**, 945 (1998).
- [11] Г. Хэниш, П. Рой. *Карбид кремния* (М., Мир, 1972) с. 17.
- [12] S. Sussman, J.R. Brandor, G.A. Scarsbrook, C.G. Sweeney, T.J. Valentine, A.J. Whitehaed, C.J. Wort. Diamond and Rel. Mater., **3**, 303 (1994).
- [13] Q. Wahab, T. Kimoto, A. Ellison, C. Hallin, M. Timonen, R. Yakimova, A. Henry, J.P. Bergman, E. Janzen. Appl. Phys. Lett., **72**, 445 (1998).
- [14] C.H. Carter, V.F. Tsvetkov, D. Henshall, O. Kordina, K. Irvine, R. Singh, S.T. Allen, J.W. Palmor. *Abstracts 2d Europ. Confer. SiC and Rel. Mater.* (Sept. 2–4, 1998, Montpellier, France) p. 1.
- [15] A.K. Agarwal, J.B. Casady, L.B. Rowland, S. Seshadri, R.R. Siergieiej, W.F. Valek, C.D. Brandt. IEEE Electron. Dev. Lett., **18**, 518 (1997).
- [16] R.R. Siergieiej, S. Sriman, R.C. Clarke, A.H. Agarwal, C.D. Brandt, A.A. Burk, T.J. Smith, A.W. Morse, P.A. Orphanos. Inst. Phys. Conf., No 142, 769 (1996).
- [17] J.A. Cooper, Jr., M.A. Melloch, J.M. Woodall, J. Spitz, K.J. Schoen, J.P. Henning. Meter. Sci. Forum, **264–268**, 895 (1998).
- [18] R. Gaska, J.W. Yang, A. Osinsky, Asif Khan, A.O. Orlov, G.L. Shidet, M.S. Shur. Appl. Phys. Lett., **72**, 707 (1998).
- [19] Ch. Brylinskii. *Abstracts 2d Europ. Confer. SiC and Rel. Mater.* (Sept. 2–4, 1998, Montpellier, France) p. 45.
- [20] S.V. Renadakova, I.P. Nikitina, A.S. Tregubova, V.A. Dmitriev. J. Electron. Mater., **27**, 292 (1998).

- [21] V. Dmitriev, S. Rendakova, N. Kuznetsov, N. Savkina, A. Andreev, M. Rastegaeva, M. Munbaeva, A. Morozov. *Abstracts 2d Europ. Confer. SiC and Rel. Mater.* (Sept. 2–4, 1998, Montpellier, France) p. 251.
- [22] A.A. Lebedev, M.G. Rastegaeva, A.L. Syrkin, N.S. Savkina, A.S. Tregubova, V.E. Chelnokov, M.P. Scheglov. *Inst. Phys. Cong. Ser*, No 155, 605 (1997).
- [23] A.A. Lebedev, A.M. Strel'chuk, V.V. Kozlovski, N.S. Savkina, D.V. Davydov, V.V. Solov'ev. *Abstracts 2d Europ. Confer. SiC and Rel. Mater.* (Sept. 2–4, 1998, Montpellier, France) p. 257.
- [24] S. Nishino, T. Yoshida, K. Matsumoto, Y. Chen, S.K. Lilov. *Abstracts 2d Europ. Confer. SiC and Rel. Mater.* (Sept. 2–4, 1998, Montpellier, France) p. 27.
- [25] K.P. Raback, R. Yakimova, M. Syvajarui, R. Neiminer, E. Janzen. *Abstracts 2d Europ. Confer. SiC and Rel. Mater.* (Sept. 2–4, 1998, Montpellier, France) p. 103.
- [26] Yu.A. Vodakov, E.N. Mokhov, M.G. Ramm, A.O. Roenkov. *Krist. and Technik*, **14**, 729 (1979).

Редактор Т.А. Полянская

## Wide-band semiconductors of power electronics

A.A. Lebedev, V.E. Chelnokov

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