

ISSN 0013-5860

**Э**  
**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**  
**Т**  
**5 2007**

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Лазарев Г.Б., Рябчицкий М.В. Обществу инженеров силовой электроники 15 лет ..... 3

### ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Елисеев В.В., Ковалёв Ф.И., Чибиркин В.В. Развитие разработок и производства силовых полупроводниковых приборов в ОАО "Электровыпрямитель" .. 5

Бьерн Баклунд. Выбор класса напряжения силовых полупроводниковых приборов ..... 9

Евсеев Ю.А., Сурма А.М. От кремния к карбиду кремния ..... 15

Современные полупроводниковые приборы "ABB Semiconductors" и "Infenion" ..... 18

### ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Беляев Д.В., Вейнгер А.М., Лазарев Г.Б., Новаковский А.Н., Султанов А.Т. Электромагнитные и электромеханические процессы в электроприводе при параллельной работе преобразователей частоты на асинхронный двигатель ..... 20

Сазонов В.В. Кондиционеры сети на основе активных фильтров ..... 28

Козлов В.В. Расчёт шаговых и синхронных электродвигателей для автомобильных электроприводов .... 34

Султанов А.Т. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод циркуляционных насосов энергетической установки ..... 41

Ворфоломеев Г.Н., Евдокимов С.А., Щуров Н.И. Синтез схем многопульсных выпрямителей с ортогональными питающими напряжениями ..... 47

Серебряков Д.С. Разработка алгоритма и устройства автоматического включения несинфазной резервной сети без перерыва в питании нагрузки ..... 54

Кузькин А.В. Моделирование и анализ алгоритма управления микроклиматом на пассажирском транспорте на базе микропроцессорной системы..61

Алексею Константиновичу Антонову ..... 64

## CONTENS

### POWER ELECTRONICS

Lazarev G.B., Ryabchickiy M.B. 15 years anniversary of Association power electronics engineer ..... 3

### SEMICONDUCTOR INSTRUMENTS AND TECHNOLOGIES

Eliseev V.V., Kovalyov F.I., Chibirkin V.V. The development of the developments and manufacture of power semiconductor devices in JSC "Elektrovypryamitel" ..... 5

Biern Baklund. The choice of the class of the voltage power semiconductor instrument ..... 9

Evseev Yu.A., Surma A.M. From silicon to silicon carbide ..... 15

Modern semiconductor instruments "ABB Semiconductors" and "Infenion" ..... 18

### SEMICONDUCTOR CONVERTERS TO ELECTRIC POWERS

Belyaev D.V., Veynger A.M., Lazarev G.B., Novakovskiy A.N., Sultanov A.T. Electromagnetic and electromechanical processes in the electric drive at parallel work of the frequency converters on the induction motor ..... 20

Sazonov V.V. The conditioners to network on base active filter ..... 28

Kozlov V.V. The calculation of step-by-step and synchronous electric motors for automobile electric drives ..... 34

Sultanov A.T. Transportation the liquid-metallic heat-carrier in installations by means of the asynchronous adjustable-frequency electric drive of main circulation .... 41

Vorfolomeev G.N., Evdokimov S.A., Schurov N.I. Synthesis of rectifier based on the topology of rotating systems of voltages of valveside windings ..... 47

Serebryakov D.S. The new algorithm and load voltage uninterrupted out-of-phase redundant circuit automatic switching on device development ..... 54

Kuzikin A.V. Modeling and analysis of the algorithm of control micro-climate on passenger transport on base of the microprocessor system ..... 61

Alexeyu Konstantinovichyu Antonovu ..... 64

# Выбор класса напряжения силовых полупроводниковых приборов

БЪЕРН БАКЛУНД

*Сформулированы рекомендации по определению и выбору класса силовых полупроводниковых приборов для наиболее известных типов преобразователей.*

Определение класса напряжения предполагаемого к использованию силового полупроводникового прибора обычно является первым шагом при разработке устройств силовой электроники. Если класс напряжения окажется слишком близок к эксплуатационному напряжению, будет высоким риск повреждения прибора, что неблагоприятно скажется на надёжности устройства в целом. Если класс напряжения выбран с чрезмерно большим запасом, будут хуже общая эффективность и характеристики, так как для приборов более высоких классов напряжения требуется более толстый кремний, который генерирует более высокие потери. Условия питающей сети и конструкция оборудования одинаково определяют те возможные уровни напряжения, которым будут подвергнуты полупроводники. Не существует простых правил, охватывающих все сферы применения, и класс прибора должен определяться для каждого конкретного случая.

Эта статья, возможно, поможет разработчику преобразовательных систем при выборе требуемого класса напряжения силового полупроводникового прибора, поскольку в ней сопоставлены различные рекомендации для наиболее известных типов преобразователей, основанных на многолетнем опыте применения силовой электроники.

Данные рекомендации справедливы только для одиночных приборов. Особенности, связанные с последовательным соединением приборов, в данной статье не рассмотрены.

**Определения параметров.** В технической спецификации на силовые полупроводниковые приборы указывается несколько значений блокирующего напряжения. Здесь дано объяснение различий между этими значениями. Естественно, определения стандартизованы и могут встречаться в различных интернациональных стандартах, таких как, например, IEC 60747.

Очень важно различать повторяющиеся перенапряжения  $V_{DR} / V_{RR}$  (коммутационные перенапряжения, возникающие на сетевой частоте) и неповторяющиеся выбросы перенапряжений  $V_{DS} / V_{RS}$ , которые возникают случайным образом (например, при грозовом разряде или переходных процессах в сети). Слишком большой выброс напряжения приведет к лавинному пробоему полупроводника, а слишком большое максимальное повторяющееся напряжение может привести к тепловому повреждению, даже если этот уровень напряжения ниже предела лавинного пробоя. Напряжение постоянного тока воздействует на прибор по-другому и будет упомянуто позднее.

$V_{DWM}, V_{RWM}$  – *максимальные рабочие прямое и обратное напряжения.* Это максимальное рабочее напряжение на сетевой частоте (рис. 1).

$V_{DSM}, V_{RSM}$  – *максимальные выбросы прямого и обратного блокирующего напряжений.* Это абсолютное максимальное напряжение импульса, которое мгновенно может выдержать прибор. В случае превышения этого напряжения полупроводниковый прибор выходит из строя. АВВ определяет этот параметр под воздействием импульса полуволны синусоиды в течение 10 мс с повторяемостью 5 Гц. Для безопасной эксплуатации значение допустимого максимального выброса напряжения прибора должно быть выше значения  $V_{DSM}$  на рис. 1.

$V_{DRM}, V_{RRM}$  – *максимальные повторяющиеся прямое и обратное блокирующие напряжения.* Это максимальное напряжение, которое прибор может выдержать повторно. Превышение этого уровня приведёт к тепловому повреждению прибора. Этот параметр определяется под воздействием импульса с шириной и повторяемостью, указанной в спецификации на прибор. Для безопасной эксплуатации допу-



Рис.1. Определения повторяющегося, неповторяющегося и нормального эксплуатационного напряжений

стимое повторяющееся напряжение прибора должно быть выше значения  $V_{DRM}$  на рис. 1.

$V_D$ ,  $V_R$  – максимальные длительные постоянное (прямое) и обратное блокирующие напряжения. Это максимальное постоянное напряжение, которое может быть приложено к прибору.

$V_{DC-link}$  – максимальное длительное постоянное напряжение для определенного потока отказов (например, 100 FIT) вследствие действия космического излучения. Превышение этого напряжения не приводит к немедленному выходу прибора из строя, но вероятность повреждения от действия космического излучения повышается экспоненциально с ростом прикладываемого напряжения.

За подробной информацией можно обратиться к Руководству 5SYA2042 "Интенсивность повреждений HiPак модулей от действия космического излучения" и 5SYA2046 "Интенсивность повреждений IGBT от действия космического излучения".

**Комментарии к определениям параметров.** Эти параметры и методы испытаний для их определения могут быть найдены в документе IEC 60747-6. Не все определяемые параметры включаются в справочные данные на прибор. Особенно это касается значений  $V_{DWM}/V_{RWM}$ , которые определяются пользователем в зависимости от предельного напряжения прибора  $V_{DSM}/V_{RSM}$ . Это объясняется тем, что, как бу-

дет показано далее, приборы сетевой коммутации выбираются в зависимости от ожидаемых переходных процессов в сети, а не по номинальному напряжению сети. Это касается и постоянного напряжения, так как здесь имеют место переходные процессы, накладывающиеся на постоянную составляющую напряжения (например, в выпрямителе). Для инверторов справедливо обратное. В инверторе полупроводниковые приборы отсоединены от источника случайных возмущений, т.е. сети посредством фильтра (ёмкостного или индуктивного). Здесь рабочее напряжение (постоянное для инвертора напряжения или переменное для инвертора тока) является определяющим напряжением, а повторяющиеся максимальные напряжения и выбросы не рассматриваются.

**Контролируемые и неконтролируемые условия.** Разработчики сталкиваются с проблемой перенапряжений в двух различных контекстах. Первый, который может быть отнесён к "контролируемым условиям", характеризуется тем, что переходные процессы возникают внутри известной части оборудования и посредством определённых компонентов цепи, таких, например, как механические или твёрдотельные реле, работающие в индуктивной цепи. Такие переходные процессы могут быть идентифицированы током, напряжением, временем и формой посредством анализа цепи или измерений. В этих условиях электрические ре-

жимы известны или "контролируемы". Напротив, во втором случае, рассматриваемом как "неконтролируемые условия", анализ схемы и, обычно, измерения отвергаются. Это случай оборудования, периферийного к большим распределительным сетям, таким как энергосети. Такие "бесконечно" распределённые сети действуют как огромные "антенны", улавливая и передавая электрические искажения от ударов молний, различных аварий распределительных сетей или коммутаций всевозможных нагрузок. Рациональный выбор класса напряжения полупроводникового прибора в таких условиях начинается со статистической обработки информации о переходных процессах в системе. Необходимо отметить, что документ IEC 60664 использует понятия "контролируемые условия" и "неконтролируемые условия" в более широком смысле, чтобы дифференцировать системы, где переходные процессы совершенно неизвестны (незащищённые, ведомые сетью) и те, где эти процессы хорошо известны (внутренняя генерация) или достаточно хорошо определены (защищённые, ведомые сетью).

#### Рекомендации по включению полупроводников в питающую сеть

**Определение требуемого класса напряжения.** Из-за наличия перенапряжений во время переходных процессов, имеющих место в питающей сети, особенно в промышленных условиях, должен быть проведён тщательный подбор конкретного полупроводникового прибора с целью коммутации этих перенапряжений без необходимости применения дорогостоящих внешних защитных устройств. Рассмотрим рис.2.

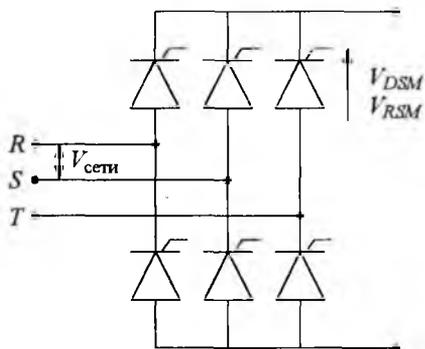


Рис.2. Определение напряжений на примере трёхфазного управляемого выпрямителя

Для расчёта требуемого класса напряжения используется формула:

$$V_{DSM} \text{ и/или } V_{RSM} = \sqrt{2} V_{\text{сети}} k, \quad (1)$$

где  $V_{\text{сети}}$  – среднее значение линейного питающего напряжения;  $k$  – коэффициент запаса, выбираемый в соответствии с качеством питающей линии.

Существует несколько публикаций, посвящённых качеству сетей, значениям и вероятности появления выбросов перенапряжений. Наиболее полной представляется инструкция IEEE C62.41-1991 "Практические рекомендации IEEE по выбросам напряжения в низковольтных цепях переменного тока". Этот стандарт определяет виды выбросов напряжения и вероятность их появления в низковольтных сетях переменного тока (менее  $1000V_{RMS}$ ) для различных степеней воздействия. Энергоустановки на территории Евросоюза должны удовлетворять директиве 89/336/ЕЕС и соответствующим стандартам ([www.cenelec.org](http://www.cenelec.org)), которые требуют установки фильтров для поглощения выбросов напряжений. Эти компоненты также повышают иммунитет систем к перенапряжениям благодаря ослаблению переходных процессов питающей сети.

Обычно условия в сетях неизвестны, поэтому коэффициент запаса  $k$  выражения (1) выбирается опытным путём. В промышленных условиях обычно выбирают  $k = 2 \div 2,5$ , однако для питающих сетей плохого качества (и при отсутствии мер защиты от перенапряжений) значение  $k$  скорее всего придётся увеличить (например  $k = 3$ ). Мощный выпрямитель, получающий питание от грозозащищённого трансформатора может быть разработан с коэффициентом запаса  $k = 2,5$ .

При использовании выпрямительных приборов с управляемой лавинной характеристикой, обычно называемых "лавинными диодами", коэффициент  $k$  может быть снижен, поскольку лавинные диоды сами будут защищать цепь от определённых случаев перенапряжений. Однако значительное снижение значения  $k$  не рекомендуется, поскольку лавинная устойчивость большинства полупроводниковых приборов ограничена их способностью поглощения энергии. АВВ производит ряд лавинных диодов со 100%-й испытанной лавинной устойчивостью на мощности 50 кВт и выше и время  $t_p = 20$  мкс.

Вопрос применения RC-цепей для тиристорных диодов в целях снижения коммутационных перенапряжений здесь не рассматривается. Этот вопрос подробно раскрыт в Руководстве 5SYA 2020 "Конструкция RC снабберов для фазового управления".

Используя (1), можно свести в таблицу предпочтительные классы напряжения силовых полупроводниковых приборов для стандартных сетевых напряжений (табл. 1).

**Комментарии к выбору коэффициента запаса.** Выбор  $k = 2,5$  может показаться произвольным, но нужно сказать, что он опирается на 40-летний опыт разработки преобразовательных систем по всему миру. Существует не так много статистических данных по распределению переходных процессов в сетях среднего напряжения, но что касается низковольтных сетей, то такие данные были получены и опубликованы в IEEE C62.41-1991.

Анализ этих документов показал, что, например, в незащищённой системе, несмотря на то, что межпроводной изоляционный промежуток рассчитан на 6 кВ, в условиях с высокой степенью воздействий 1 раз в год на одну установку, может возникнуть перенапряжение амплитудой 20 кВ. Незащищённой системой считается такая система, в которой отсутствуют фильтры, подавители, снабберы или искровые промежутки (включая "случайные" промежутки, например межпроводные расстояния в соединительных коробках). Была выявлена низкая чувствительность амплитуд переходных процессов к изменениям номинального линейного напряжения. Это объясняется тем, что выбросы напряжения внутри распределённой

сети будут передаваться посредством межмоточной ёмкости трансформатора с маленьким отношением числа витков. Это означает, что при отсутствии лучших данных, упомянутые документы могут использоваться и для сетей среднего напряжения. Принимается, что сопротивление в области высокого уровня возмущений составляет 12 Ом для быстрых (5 мкс) переходных процессов и 2 Ом для медленных (50 мкс) процессов, что упрощает разработку входных фильтров.

Принимая во внимание, что IEC 60747 позволяет производителю определять (и объявлять) значения ширины импульса и повторяемости при испытаниях  $V_{DRM/RRM}$  и  $V_{DSM/RSM}$ , испытания для  $V_{DWM/RWM}$  предусматриваются на частоте сети для полной синусоиды. Как уже было отмечено, рабочие напряжения при этом не указываются, и обычной практикой для приборов низкого и среднего напряжений стало в целях упрощения проводить испытания для  $V_{DRM/RRM}$  таким же образом, как и для  $V_{DWM/RWM}$ . Однако высоковольтные приборы (более 5 кВ) требуют возврата к исходным международным стандартам во избежание наступления теплового повреждения или снижения температурных номиналов во время испытаний.

#### Рекомендации по включению полупроводников на стороне инвертора

Выбор класса напряжения инвертора отличается от выбора класса выпрямителя. Особенно это касается инверторов напряжения, где фильтр звена постоянного тока (конденсаторная батарея) отфильтровывает случайные переходные процессы, происходящие в неконтролируемых условиях (сети). Это значит, что коэффициент запаса по напряжению может быть уменьшен и нет необходимости в параметре  $V_{DSM/RSM}$ . С другой стороны, длительное действие постоянного напряжения на прибор ведёт к более высокой вероятности повреждения от действия космической радиации или теплового отказа. Таким образом, в этом случае детерминирующим является постоянное рабочее напряжение.

**Основные конфигурации.** Рекомендуемый класс напряжения для активного коммутирующего элемента и его обратного диода в инверторах напряжения определяется не только напряжением питания, но также и конфигурацией инвертора. Основное внимание обратим

Таблица 1

**Предпочтительные классы напряжения для силовых полупроводниковых приборов при стандартных напряжениях питающей сети**

Номинальное напряжение сети	Предпочтительный класс блокирующего напряжения ( $V_{DSM}/V_{RSM}$ )
400 $V_{RMS}$	1400
500 $V_{RMS}$	1800
690 $V_{RMS}$	2400
800 $V_{RMS}$	2800
1000 $V_{RMS}$	3600
1200 $V_{RMS}$	4200
1500 $V_{RMS}$	5200
1800 $V_{RMS}$	6500

на наиболее распространённые топологии инверторов и рекомендованные для них классы напряжений для основных уровней питающего напряжения. Рассмотрим двухуровневый инвертор напряжения (рис.3), трёхуровневый инвертор напряжения (рис.4) и инвертор тока (рис.5). Другие конфигурации, такие как многоуровневые инверторы, в данной статье не рассматриваются.

Для инверторов напряжения существуют 3 типа напряжений, которые в наибольшей степени оказывают влияние на длительность жизненного цикла прибора:

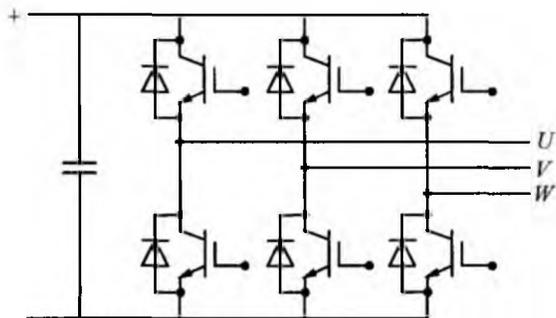


Рис.3. Двухуровневый инвертор напряжения на IGBT

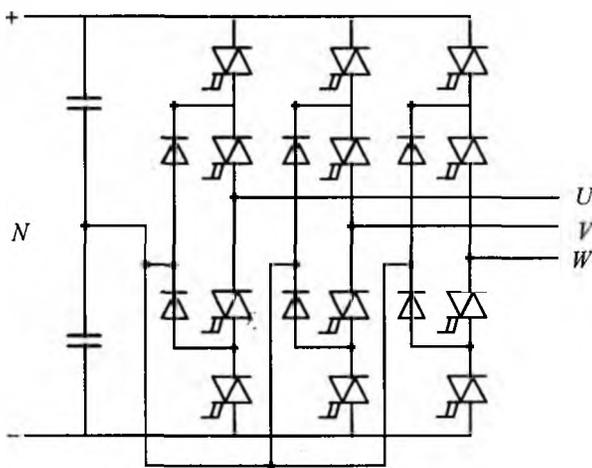


Рис.4. Трёхуровневый инвертор напряжения на IGCT с обратной проводимостью

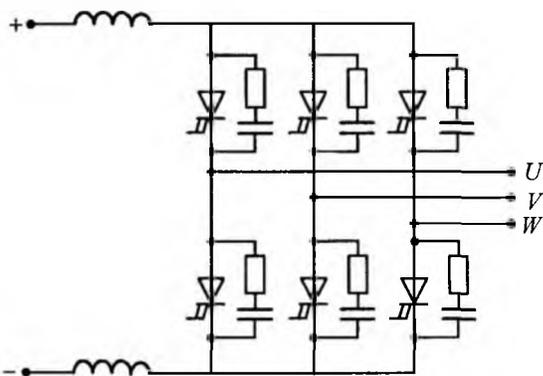


Рис.5. Инвертор тока на симметричных IGCT

1) постоянное напряжение, которое определяет интенсивность повреждений приборов от действия космической радиации и долгосрочную стабильность тока утечки;

2) повторяющиеся выбросы перенапряжения при выключении, которые не должны превышать допустимых значений  $V_{DRM}$  прибора;

3) максимальное напряжение, под действием которого прибор должен коммутировать ток, чтобы гарантировать заявленную область безопасной работы; это напряжение может быть определено в условиях КЗ с учётом пульсаций напряжения фильтра, но не рассматривается в рамках данной статьи.

Для оптимального использования силового полупроводникового прибора очень важно минимизировать индуктивность рассеяния контура коммутации, так как большая индуктивность индуцирует значительные выбросы перенапряжения, что требует более высокого номинала  $V_{DRM}$  прибора. Примеры влияния индуктивности рассеяния представлены в руководстве 5SYA2032 "Применение IGCT".

**Двухуровневый инвертор напряжения.** В такой конфигурации, каждый полупроводниковый прибор будет находиться под действием полного постоянного напряжения. Требуемое значение постоянного напряжения в зависимости от питающего напряжения рассчитывается при помощи выражения

$$V_{DC} = V_{номRMS} \sqrt{2} \left( 1 + \frac{x}{100} \right), \quad (2)$$

где  $x$  – коэффициент перенапряжения, который зависит от области применения и соответствует нормальным линейным допускам; для обычных промышленных сетей  $x = 10\%$  для низковольтных систем и  $x = 15\%$  для систем среднего класса напряжений; для тяговых цепей обычно  $x = 20\%$ .

Рассчитать требуемое значение максимального повторяющегося напряжения можно по формуле

$$V_{DR} = V_{DC} \left( 1 + \frac{y}{100} \right), \quad (3)$$

где  $y$  – коэффициент запаса, который необходимо выбрать, исходя из условий коммутаций и индуктивностей рассеяния.

Для определения требуемого класса напряжения используется 50%-й запас для инверторов с низкой индуктивностью рассеяния и 60%-й

запас для инверторов, работающих со средним уровнем индуктивностей рассеяния. Наиболее предпочтительным является такой выбранный класс прибора, который будет выше расчётного, ближайший из стандартного ряда.

По выражениям (2) и (3) определены и сведены в табл.2 предпочтительные классы напряжения для полупроводниковых приборов при стандартных линейных напряжениях.

**Трёхуровневый инвертор напряжения.** В таком инверторе к каждому полупроводниковому прибору прикладывается только половина полного постоянного напряжения. Требуемое постоянное напряжение в зависимости от питающего напряжения определяется выражением

$$V_{DC} = \frac{V_{\text{ном}RMS} \sqrt{2} \left(1 + \frac{x}{100}\right)}{2}, \quad (4)$$

где  $V_{DC}$  – постоянное напряжение на приборе;  $x$  – коэффициент перенапряжения, который зависит от условий эксплуатации; для промышленных сетей обычно  $x = 15\%$ , для электротяги  $x = 20\%$ .

Для определения требуемого класса напряжения используется 50%-й запас для инверторов с низкой индуктивностью рассеяния и 60%-й запас для инверторов, работающих со средним уровнем индуктивностей рассеяния. Наиболее предпочтительным является такой выбранный класс прибора, который будет выше расчётного, ближайший из стандартного ряда.

По выражениям (3) и (4) определены предпочтительные классы напряжения для полупроводниковых приборов при стандартных линейных напряжениях (табл.3).

**Инверторы тока.** Поскольку инвертор тока работает как с переменным, так и с постоянным напряжением, класс напряжения полупроводникового прибора определяется иначе, чем для инвертора напряжения. Для выбора напряжения с учётом космического излучения обычно используется значение максимального переменного напряжения на приборе. Оно определяется по формуле

$$V_{AC\text{пик}} = V_{\text{ном}RMS} \sqrt{2} \left(1 + \frac{x}{100}\right), \quad (5)$$

Таблица 2

**Предпочтительные классы блокирующего напряжения для силовых полупроводниковых приборов, используемых в двухуровневых инверторах напряжения**

Номинальное напряжение сети	Номинальное напряжение звена постоянного тока с учётом влияния космического излучения, В	Предпочтительный класс повторяющегося блокирующего напряжения, В
400 $V_{RMS}$	620	1200
750 $V_{DC}$	900	1700
690 $V_{RMS}$	1070	1700
1500 $V_{DC}$	1800	3300
1700 $V_{RMS}$	2800	4500
3000 $V_{DC}$	3600	6000
3300 $V_{DC}$	4000	6500

Таблица 3

**Предпочтительные классы блокирующего напряжения для силовых полупроводниковых приборов в трёхуровневом инверторе напряжения**

Номинальное напряжение сети	Номинальное напряжение звена постоянного тока с учётом влияния космического излучения, В	Предпочтительный класс повторяющегося блокирующего напряжения, В
2300 $V_{RMS}$	1900	3300
3300 $V_{DC}$	2000	3300
3300 $V_{RMS}$	2700	4500
4160 $V_{RMS}$	3400	5500
6000 $V_{RMS}$	4900	8000
6600 $V_{RMS}$	5400	8500
6900 $V_{RMS}$	5600	9000
7200 $V_{RMS}$	5900	9500

Предпочтительные классы напряжения силовых полупроводниковых приборов при их использовании в инверторах тока

Номинальное линейное напряжение	Номинальное значение максимального переменного напряжения, В, с учётом влияния космического излучения	Предпочтительный класс повторяющегося блокирующего напряжения, В
2300 $V_{RMS}$	3700	6500
3300 $V_{RMS}$	5400	9000

где  $x$  – коэффициент перенапряжения, зависящий от условий эксплуатации; для промышленности  $x = 15\%$ .

Для расчёта требуемого класса напряжения используется формула:

$$V_{DR} = V_{номRMS} \left( 1 + \frac{y}{100} \right), \quad (6)$$

где  $y$  – коэффициент запаса, который необходимо выбрать исходя из условий коммутаций и индуктивностей рассеяния.

При высокой индуктивности рассеяния коэффициент запаса обычно принимается 70%. Наиболее предпочтительным является такой выбранный класс прибора, который будет выше расчётного, ближайший из стандартного ряда.

По выражениям (5) и (6) определены предпочтительные классы напряжения для полупроводниковых приборов при стандартных линейных напряжениях (табл.4).

**Классы напряжения для активных преобразователей.** "Инверторные" приборы ста-

ли все чаще применяться в активных выпрямителях. Это значит, что они должны выбирать тем же способом, что и тиристоры, т.е. по напряжению  $V_{DSM/RSM}$ . Пока это не является правилом, поскольку управляемые приборы (IGCT, IGBT и GTO) являются более дорогостоящими по сравнению с тиристорами и используются в сочетании с адекватной защитой, такой как фильтровые конденсаторы, и их условия эксплуатации понимаются как контролируемые. С другой стороны, при выборе симметричных выключаемых приборов, таких как RB-IGCT (или "SGCT") необходимо использовать параметры  $V_{DWM/RWM}$  (см. рис.1) для определения долговременной устойчивости по напряжению и устойчивости к космическому излучению, в той же степени, что и параметры напряжения звена постоянного тока в случае ассиметричных приборов.

Бьерн Баклунд – ведущий специалист "ABB Switzerland Ltd Semiconductor".

## От кремния к карбиду кремния

ЕВСЕЕВ Ю.А., СУРМА А.М.

Обсуждаются вопросы применения в силовой электронике новых полупроводниковых материалов – карбида кремния (SiC) и алмаза (C). Исторический опыт разработки и производства монокристаллического кремния позволяет ответить на вопрос, какие перспективы имеются для широкого применения SiC и C.

В [1] обсуждаются вопросы, связанные с применением новых материалов силовой электроники, в том числе карбида кремния (SiC) и алмаза (модификации углерода C). Исторически полученный в течении последних 45 лет опыт освоения в производстве монокристалли-

*In this paper the questions of application in power electronics of new semiconductor materials – silicon carbide (SiC) and diamond (C) are discussed. The historical experience of development and production of monocrystal silicon allows to answer a question, what prospects are available for wide application SiC and C.*

ческого кремния (МК) позволяет ответить на вопрос, какие имеются перспективы широкого применения SiC и C.

Анализ состояния разработок и производства силовых полупроводниковых приборов (СПП) показывает, что на первом этапе для

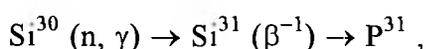
мощных полупроводниковых приборов в основном использовался МК, выращиваемый по методу Чохральского, который позволял в кварцевых тиглях получать монокристаллы диаметром до 50 мм и более.

Однако максимальное напряжение, которое удавалось достичь, не превышало 1600–1800 В, даже при увеличении удельного сопротивления (УС) материала. Ограничением был кислород, который попадал из кварцевого тигля в МК и при нагреве (технологические процессы) образовывал донорные центры, снижающие УС материала.

Следующим материалом был бестигельный МК.

Этот материал значительно уступал первому по разбросу УС, но не содержал кислорода, что позволяло получать более высоковольтные приборы. Недостатком был относительно небольшой диаметр бестигельного МК (на том этапе не более 25–27 мм). Переход на большие диаметры требовал разработки и освоения нового ростового оборудования, новых технологических решений. В результате был создан бестигельный МК на диаметры слитков не менее 30, 40, 50, 80 мм, на базе которых были разработаны мощные тиристоры с диаметром выпрямительного элемента 30, 40, 50, 80 мм. Напряжение переключения и пробоя было доведено до 3,3 кВ для тиристоров и до 5 кВ для диодов, значения токов составили 320, 500, 630 и 1250 А. Однако процент выхода высоковольтных тиристоров был крайне низок (около 3%), что было явно недостаточно для крупномасштабного производства. Исследования бестигельного МК показали, что основной причиной низкого процента выхода высоковольтных приборов явилось наличие в монокристаллах кремния микронеоднородностей сопротивления, которые не выявлялись принятыми в производстве методиками и которые существенно снижали напряжение пробоя электронно-дырочных переходов. Применение радиационно-легированного кремния, лишённого указанного недостатка (микронеоднородностей сопротивления), позволило снизить разброс удельного сопротивления на порядок по сравнению с бестигельным МК. Это позволило поднять процент выхода до 30–40%.

Технология получения РЛК основывалась на следующей формуле:



из которой следует, что воздействие нейтрона  $n$  на атом стабильного изотопа кремния  $\text{Si}^{30}$  (содержание этого изотопа в естественном кремнии составляет около 3%) приводит к возникновению атома нестабильного изотопа кремния  $\text{Si}^{31}$  с периодом полураспада около 2,6 ч, при распаде которого образуется атом фосфора.

Если перейти к карбиду кремния, то для получения совершенного монокристаллического материала, необходимого для изготовления высоковольтных приборов силовой электроники, обнаруживается ряд новых по сравнению с кремнием затруднений.

В отличие от кремния карбид кремния ( $\text{SiC}$ ) является бинарным соединением, кристаллическая решётка которого состоит из атомов двух типов. Обеспечить при выращивании монокристалла бинарного соединения совершенную кристаллическую решётку оказывается значительно более сложной задачей по сравнению с "моноатомными" кристаллами вследствие гораздо большего разнообразия возможных типов локальных и протяжённых дефектов кристаллической структуры. Именно этим можно объяснить, например, весьма медленное развитие электроники на основе арсенида галлия ( $\text{GaAs}$ ), несмотря на то, что физические свойства этого материала позволяют существенно улучшить характеристики полупроводниковых устройств по сравнению с кремниевыми в целом ряде отраслей, таких как микроэлектроника, солнечная энергетика и др. Для карбида кремния задача получения совершенной кристаллической решётки ещё более сложна, чем для арсенида галлия. Дело в том, что в отличие от большинства бинарных полупроводников ( $\text{GaAs}$ ,  $\text{InSb}$ ,  $\text{CdS}$  и др.), кристаллизующихся лишь в одном из двух возможных типов структур (тип сфалерита или тип вюрцита),  $\text{SiC}$  может кристаллизоваться в огромном множестве типов структур (так называемых политипов), имеющих идентичную тетраэдрическую координацию атомов в ближнем порядке и различающихся дальним порядком расположения атомов. В одном монокристалле  $\text{SiC}$  могут сосуществовать области с различными политипическими формами кристаллической решётки, границы между которыми являются протяжёнными дефектами.

Сказанное проясняет первое принципиальное различие в ходе развития кремниевой и карбид-

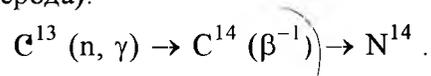
кремниевой технологий. Если для кремния задача получения монокристаллов с малодефектной кристаллической структурой была решена относительно быстро и безболезненно, а далее усилия исследователей и технологов были сосредоточены на задаче "второго уровня" – получении высокочистых монокристаллов с контролируемым уровнем концентрации легирующей примеси, то для SiC большие затруднения вызывает решение уже первой из этих задач. Этим во многом объясняется современное состояние дел в сравнительном развитии этих технологий, поскольку "старт" исследований, посвящённых применению Si и SiC, как основы для электронных приборов, произошёл приблизительно одновременно – в первой половине прошлого века.

И все же, несмотря на отрицательный "исторический опыт" (практически полувековые малопродуктивные усилия), проблема получения монокристаллических слоёв SiC с малодефектной кристаллической структурой похоже не является неразрешимой. В течение последних 10 лет, во многом благодаря усилиям специалистов фирмы "Cree" и совершенствованию технологического оборудования для получения слоёв полупроводниковых материалов методами молекулярной эпитаксии, качество монокристаллических слоёв SiC заметно выросло. Это позволило ряду фирм освоить промышленное производство силовых карбидкремниевых диодов Шоттки на напряжение до 1200 В и токи до 50 А.

Экспериментальные образцы более высоковольтных приборов на основе SiC представлены в ряде научных публикаций, однако с начала XXI в. заметного роста напряжения серийно выпускающихся приборов не происходит. Одной из вероятных причин этого является проблема микронеоднородностей удельного сопротивления в слоях SiC, предназначенного для силовых приборов, сходная с описанной выше для кремния.

Для кремния проблема была решена применением технологии радиационного легирования. В случае SiC применение такой технологии встречает затруднение. В качестве "традиционной" легирующей примеси донорного типа для SiC применяется азот N, который позволяет получить относительно "мелкие" уровни вблизи дна зоны проводимости с энергией активации около 0,1 эВ и, кроме того, имеет вы-

сокую растворимость в исходном SiC. При облучении карбид кремния нейтронами, в принципе, возможно получение атомов азота за счёт реакции со стабильным изотопом углерода  $C^{13}$  (около 1% в естественной смеси изотопов углерода):



Однако сечение захвата нейтрона атомом углерода невелико, а образующийся при захвате нестабильный изотоп  $C^{14}$  имеет период полураспада около 5,7 тыс. лет, что сводит на нет практическую применимость данного метода.

Фосфор также является примесью донорного типа в SiC, однако его свойства, как легирующей примеси, в настоящее время изучены относительно слабо [2]. Тем не менее, например в [3], показана принципиальная осуществимость легирования SiC атомами фосфора за счёт трансмутации атомов кремния при облучении тепловыми нейтронами, что внушает осторожный оптимизм по поводу перспектив получения слоёв SiC для высоковольтных приборов силовой электроники.

Однако даже при относительно низком качестве получаемого в настоящее время карбида кремния имеются технологические ниши, в которых SiC не имеет конкуренции: это высокотемпературные (более 200°C окружающей среды) высокочастотные преобразователи, светодиоды и т.д.

По отношению к приборам на основе углерода (алмаза) технология радиационного нейтронного легирования не применима из-за слишком большого периода полураспада получающихся в результате ядерной реакции изотопов. Поэтому для таких приборов придется искать принципиально новые технологии обеспечения легирования подложки для силовых приборов.

## Выводы

1. Прогресс в вопросе применения кремния в качестве основного материала приборов силовой электроники был обусловлен созданием принципиально новой радиационной технологии легирования Si.

2. Получение высококачественных слоёв кремния и алмаза (SiC и C), необходимых для создания приборов силовой электроники, оказалось связанным с решением ряда дополнительных сложных технологических проблем. Поэтому

му технология создания слоев SiC для силовой электроники в настоящее время ещё только подходит к осознанию необходимости решения проблемы обеспечения контролируемого легирования высокоомных слоёв – проблемы, решённой в кремниевой технологии в конце 70-х годов прошлого века. Для технологии алмаза эта задача пока вообще не ставится, так как не известны даже принципиальные подходы к её решению. Таким образом, создание коммерческих технологий производства действительно высоковольтных приборов силовой электроники (свыше 5 кВ) на базе этих широкозонных полупроводниковых материалов вполне может сильно затянуться.

3. Возможно выход из создавшейся ситуации – в использовании нанотехнологий. В частности, появились сообщения о создании нанотранзисторов на основе углеродных нанотру-

бок [4], которые рассматриваются как идеальные кандидаты для использования в микро- и нанoeлектронике. По аналогии с предыдущей практикой, когда технологии милли- и микроприборов были использованы для производства силовых полупроводниковых приборов, можно предвидеть создание СПП на основе нанотехнологий. Но это вопрос, который требует отдельного рассмотрения.

#### Список литературы

1. Ковалёв Ф.И., Евсеев Ю.А. Новые полупроводниковые материалы для силовых приборов // Электротехника. 2006. №10. С.7–8.
2. Лебедев А.А. Центры с глубокими уровнями в карбиде кремния // ФТП. 1999. Т.33, вып.2. С.129–155.
3. Баранов П.Г. и др. Электронный парамагнитный резонанс в нейтронно-легированных полупроводниках с измененным изотопным составом // Физика твёрдого тела. 2003. Т.45, вып.6. С.984–995.
4. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника / Под ред. П.П. Мальцева. М.: Техносфера, 2006.

## Современные полупроводниковые приборы "ABB Semiconductors" и "Infenion"<sup>1</sup>

23 ноября 2006 г. в Московском энергетическом институте (ТУ) состоялся семинар, на котором были обсуждены последние разработки компаний "ABB Semiconductors" и "Infenion" современных силовых полупроводниковых приборов.

Семинар был организован при поддержке Общества инженеров силовой электроники, ЦПМК РУСТЭЛ – официального дистрибьютера "ABB Semiconductors" и кафедры "Электрические и электронные аппараты" МЭИ.

Компания "ABB Semiconductors" представила IGBT модули серии HiPak™ и тиристоры IGCT, которые широко применяются в промышленности и на транспорте.

Силовые модули серии HiPak™ – мощные полностью управляемые полупроводниковые

приборы на основе IGBT (биполярного транзистора с изолированным затвором), выполненные на стандартном основании размером 190×140 мм в корпусах для применения в промышленности и на транспорте. Материалом основания для этих приборов является сплав алюминия с карбидом кремния (AlSiC), что позволило обеспечить высокую термоциклическую стойкость, удовлетворяющую жёстким требованиям электротяги. Применение в качестве материала подложки нитрида алюминия (AlN) обеспечивает малое тепловое сопротивление.

ABB оптимизировала изготавливаемые ею IGBT для работы в тяжёлых условиях эксплуатации. Это было достигнуто благодаря найденному компромиссу между обеспечением достаточно малого падения напряжения в проводящем состоянии и реализацией мягких характеристик переключений, что является основой для применения управляемых полупроводников в цепях с большой индуктивностью.

<sup>1</sup> Обзор подготовлен А.В. Ореховым по материалам компаний "ABB Switzerland Ltd Semiconductors" и "Infineon".