

Перегрев SiC фототиристора в процессе включения и распространения включенного состояния

© М.Е. Левинштейн[¶], Т.Т. Мнацаканов*, С.Н. Юрков*, J.W. Palmour⁺

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

* Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина,
111250 Москва, Россия

⁺ CREE Inc., 4600 Silicon Dr.,
Durham NC 27703, USA

(Получена 7 февраля 2012 г. Принята к печати 12 марта 2012 г.)

Развита простая адиабатическая модель включения и распространения включенного состояния в SiC-фототиристоре, позволяющая оценить перегрев структуры с учетом величины коммутируемого тока I_{\max} , скорости нарастания тока dI/dt , мощности/энергии используемого для коммутации ультрафиолетового источника света, площади, первоначально включаемой светом, и постоянной времени включения тиристора τ . Обоснована применимость адиабатического приближения при оценке перегрева структур. Показано, что мгновенная максимальная плотность мощности приблизительно обратно пропорциональна площади первоначального включения тиристора. Полученные оценки показывают, что во избежание недопустимого перегрева структуры значение максимальной плотности тока при включении j_{\max} не должно превышать $\sim (2-3) \cdot 10^4$ А/см². Принимая для оценки $j_{\max} \approx I_{\max}/\pi r_0^2 \approx U_0/\pi r_0^2 R_l$, можно для заданного напряжения, с которого включается структура, U_0 и выбранного сопротивления нагрузки R_l оценить радиус оптического окна r_0 .

1. Введение

Переключаемые светом полупроводниковые приборы [1], в том числе фототиристоры на основе GaAs и Si, нашли многочисленные практические применения, в числе которых можно указать синхронизацию мощных лазеров, возбуждение эксимерных лазеров, высоковольтную гальваническую развязку между схемами управления и силовыми цепями (см., например, [2–6]).

Фототиристоры на основе карбида кремния были впервые исследованы в работах [7,8]. В этих работах тиристор на основе 4H-SiC с блокирующим напряжением 2.6 кВ включался на максимальный ток $I_{\max} = 11$ А импульсом света ультрафиолетового лазера с длиной волны излучения $\lambda = 337$ нм. Недавно включение тиристора на основе 4H-SiC с блокирующим напряжением 12 кВ на ток 40 А импульсом света ультрафиолетового лазера с длиной волны излучения $\lambda = 266$ нм (энергия фотонов $E_{ph} \approx 4.66$ эВ) было описано в работе [9]. Следует заметить, что кремниевый фототиристор с блокирующим напряжением 7 кВ может быть включен импульсом лазера на ток 2000 А [6].

Одной из основных задач на пути дальнейшего развития SiC-фототиристоров является увеличение максимального переключаемого тока I_{\max} . Как показано в работе [9], решение этой задачи требует установления физически обоснованного компромисса между размером первоначально включаемой площади тиристора величиной коммутируемого тока I_{\max} , скоростью нарастания тока dI/dt , мощностью и энергией используемого для коммутации ультрафиолетового (UV) источника света и постоянной времени включения тиристора τ .

Известно, что первоначальное включение тиристора внешним воздействием может быть осуществлено в пределах относительно небольшой площади (область первоначального включения (ОПВ)). Затем включенное состояние спонтанно распространяется на всю площадь тиристора за счет процесса распространения включенного состояния, впервые описанного в работе [10]. Этот процесс достаточно подробно исследован для тиристоров Si и GaAs, однако для тиристоров на основе SiC остается практически неисследованным.

Чем меньше размер ОПВ, тем меньшая энергия требуется от источника света. Это чрезвычайно важно для SiC-тиристоров, поскольку большая ширина запрещенной зоны карбида кремния (3.23 эВ при комнатной температуре) обуславливает необходимость использования для переключения таких тиристоров источников света с очень большой энергией кванта ($E_{ph} \geq 3.6$ эВ). Оптимальным источником света могли бы явиться полупроводниковые ультрафиолетовые светодиоды [11]. Однако даже в импульсном режиме мощность, которая может быть получена от таких источников, невелика. Необходимая для переключения 4H-SiC-тиристоров энергия может быть легко получена при использовании газовых или твердотельных лазеров. Однако эти источники света громоздки, характеризуются низким коэффициентом полезного действия, и, кроме того, распределение света внутри светового пятна у таких источников весьма неравномерно.

При малом размере ОПВ плотность тока при включении может быть в десятки и даже в сотни раз больше, чем в стационарном состоянии, когда ток распределен по всей площади тиристорной структуры. Если включение осуществляется достаточно быстро (большие

[¶] E-mail: melev@nimis.ioffe.rssi.ru

значения dI/dt), прибор может быть разрушен за счет перегрева на этапе включения.

Увеличение коммутируемого тока I_{max} может быть достигнуто за счет последовательного включения с резистивной нагрузкой достаточно большой индуктивности L_l [9,12]. Индуктивность замедляет нарастание тока. Поэтому включенное состояние за время включения распространяется на большую площадь, и плотность тока снижается, что предотвращает деструкцию прибора. При таком способе включения, однако, утрачивается одно из основных преимуществ SiC-фототиристорov: значительно меньшая, чем у тиристорov на основе Si и GaAs постоянная времени включения τ при равном блокирующем напряжении [13].

Оптимизация отмеченных выше условий может быть достигнута только на основе модели, учитывающей разогрев тиристорной структуры в процессе включения и распространения включенного состояния. Полное решение этой задачи требует создания достаточно сложной модели даже для простейшего случая осесимметричной структуры. Однако задачу можно существенно упростить, основываясь на следующих обстоятельствах. Во-первых, характерное время t_D , за которое выделяющееся в тиристоре тепло доходит до теплоотвода, практически во всех случаях значительно больше, чем время включения тиристора $t_r = (2-3)\tau$. Во-вторых, как ясно из простых физических соображений (и будет подтверждено последующими расчетами), основной перегрев во включаемой тиристорной структуре достигается за время порядка нескольких t_r , т.е. за время значительно меньшее, чем t_D . Наконец, как будет показано далее, время распространения включенного состояния даже через самую большую из созданных и исследованных в настоящее время фототиристорных SiC-структур оказывается порядка t_D .

Действительно, характерное время t_D может быть оценено как [14]

$$t_D \approx \frac{W^2}{\chi}, \tag{1}$$

где W — ширина блокирующей („толстой“) базы тиристора, χ — коэффициент температуропроводности.

Приняв $W = 90 \mu\text{м}$ [9] и значение χ при комнатной температуре $\chi = 1.7 \text{ см}^2/\text{с}$ [15], получим оценку для характерного времени диффузии тепла от верхней, наиболее перегретой части структуры, до теплоотвода $t_D \approx 48 \text{ мкс}$. С ростом температуры значение χ монотонно уменьшается и, следовательно, величина t_D монотонно возрастает. Между тем значение t_r для SiC-тиристора с $W = 90 \mu\text{м}$ составляет (20–80) нс в зависимости от приложенного анодного напряжения [9]. Таким образом, условие $t_r \ll t_D$ заведомо выполняется.

Скорость распространения включенного состояния в SiC-тиристорах, насколько нам известно, никогда не исследовалась. Однако параметры, ответственные за скорость распространения включенного состояния [16], в карбиде кремния не сильно отличаются от соответствующих величин в кремнии. Поэтому для оценки можно принять, что предельная скорость распространения v_s составит в рассматриваемом случае

$v_s \approx 10^4 \text{ см/с}$ [16,17]. В результате для осесимметричного случая, когда включенное состояние распространяется от центра цилиндрической структуры к периферии, для SiC-фототиристора с самым большим на сегодняшний день радиусом структуры $R = 0.6 \text{ см}$ время распространения включенного состояния вдоль структуры составит $\sim 60 \text{ мкс}$.

Таким образом, большая часть процесса распространения, в течение которой плотность тока и разогрев особенно велики, протекает практически в адиабатических условиях, когда все выделившееся тепло идет на разогрев структуры. Рассмотрение процесса включения и распространения включенного состояния в рамках адиабатического приближения позволяет заметно упростить задачу и в то же время выявить и проанализировать основные соотношения между отмеченными выше параметрами фототиристора: размером первоначально включаемой площади тиристора, величинами I_{max} , dI/dt , постоянной времени τ и энергией используемого для коммутации UV источника света.

В данной работе в рамках адиабатического приближения проанализированы основные особенности возможных тепловых режимов при включении SiC-фототиристора и распространении включенного состояния вдоль структуры.

2. Постановка задачи и условия моделирования

Простейшей моделью, позволяющей проанализировать особенности тепловых режимов в процессе включения и распространения включенного состояния, является осесимметричная модель, представленная на рис. 1.

В отличие от классических кремниевых и арсенид-галлиевых тиристорov, в SiC-тиристорах слабо легированная блокирующая база имеет p -тип проводимости. Относительно сильно легированная узкая база имеет проводимость n -типа. Тиристорная структура радиуса R включается импульсом света в пределах оптического

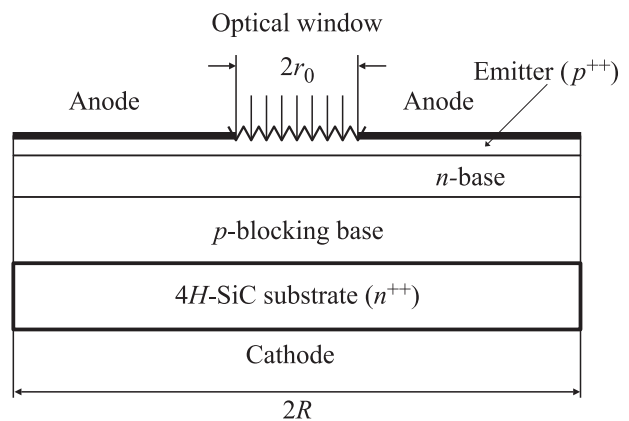


Рис. 1. Схематическое изображение фототиристорной 4H-SiC структуры.

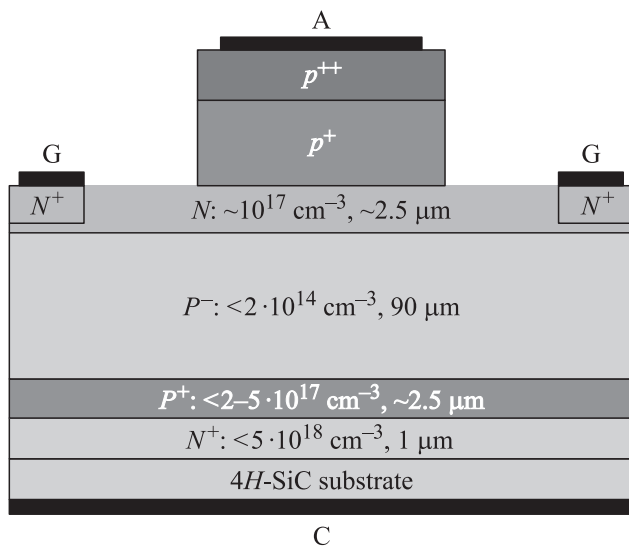


Рис. 2. Поперечное сечение тиристорной структуры [9,18].

окна радиусом r_0 . Включенное состояние распространяется радиально со скоростью, зависящей от мгновенной плотности тока, протекающей через тиристор.

Поперечное сечение фототиристора представлено на рис. 2. Параметры тиристора соответствуют параметрам прибора, описанного в работе [18] и исследованного в режиме фототиристора в работе [9].

Толщина подложки 4H-SiC составляла 300 мкм. Уровень легирования равнялся 10^{19} см^{-3} . Буферный слой p^+ -типа ограничивает область объемного заряда (ООЗ) при прямом смещении. С учетом неполной ионизации примесей при уровне легирования $N_a = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ концентрация свободных дырок в этом слое составляла при комнатной температуре $p = 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Неполная ионизация примесей учитывалась также и для других p -слоев структуры. Особенно существен этот эффект для сильно легированного p^{++} -эмиттера. При принятом уровне легирования p^{++} -эмиттера $N_a = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ концентрация свободных дырок при комнатной температуре составляла $p = 4.7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Значения времени жизни носителей в блокирующей базе тиристора шириной $W_p = 90 \text{ мкм}$ принимались равными $\tau_{p0}^p = \tau_{n0}^p = 1 \text{ мкс}$; в узкой базе $\tau_{p0}^n = \tau_{n0}^n = 0.1 \text{ мкс}$. Времена жизни носителей в сильно легированном p^{++} -эмиттере принимались равными 0.85 нс. При указанных значениях параметров постоянная времени нарастания тока при включении была близка к экспериментально наблюдавшимся в работе [9] значениям.

Переходные процессы в тиристорной структуре моделировались с помощью компьютерной программы „Исследование“ [19]. Эта программа основана на современных уравнениях переноса носителей заряда в полупроводниках, позволяющих корректно учитывать полную совокупность нелинейных эффектов высокого уровня инжекции и высокого уровня легирования: ожереккомбинацию, электронно-дырочное рассеяние, суже-

ние ширины запрещенной зоны, зависимости кинетических коэффициентов и времени жизни носителей заряда от уровня легирования в сильно легированных слоях структуры и т.д. [20]. С помощью этой программы нами ранее были с успехом промоделированы как статические, так и динамические характеристики 4H-SiC-диодов и тиристоров [20–22]. Значения параметров SiC принимались в соответствии с данными, приведенными в работе [13].

Включение тиристора осуществлялось в простой резистивной цепи с постоянного анодного напряжения $U_0 = 800 \text{ В}$ при последовательно включенном сопротивлении нагрузки $R_l = 5.0 \text{ Ом}$. Включение осуществлялось внесением в базы тиристора неравновесного заряда, превышающего критическую плотность заряда q_{cr} [23,24]. Величина q_{cr} составила для данной структуры $q_{cr} = 3.9 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/см}^2$.

Расчет проводился для трех значений радиуса оптического окна r_0 (рис. 1): $r_0 = 800 \text{ мкм}$ (площадь первоначального включения $S_0 \approx 0.02 \text{ см}^2$); $r_0 = 400 \text{ мкм}$ ($S_0 \approx 0.005 \text{ см}^2$) и $r_0 = 200 \text{ мкм}$ ($S_0 \approx 1.25 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$). Радиус тиристорной структуры R_0 во всех случаях принимался равным 6000 мкм.

В процессе моделирования самосогласованно учитывались рост тока, увеличение площади включенного состояния и обусловленное ими нарастание температуры структуры. Нагрев, как указывалось выше, считается адиабатическим.

Поскольку зависимость $v(j)$ в SiC-тиристорах не исследовалась, мы использовали для расчетов наиболее адекватную, на наш взгляд, зависимость, измеренную для Si-тиристора с толщиной блокирующей базы 200 мкм [17], которая с достаточной точностью может быть аппроксимирована выражением

$$v = A(j - j_0)^{1/2}, \quad (2)$$

где $A = 316.4 \text{ см}^2/(\text{с} \cdot \text{А}^{1/2})$, $j_0 = 1 \text{ А/см}^2$.

Расчитанное в соответствии с выражением (2) значение скорости распространения равняется 10^4 см/с при плотности тока $j = 1000 \text{ А/см}^2$. Как мы убедимся далее, при определенных условиях плотность тока в процессе включения может быть существенно больше. Между тем все теории распространения включенного состояния, как диффузионная, так и полевая, предсказывают, что при неограниченном возрастании плотности тока скорость распространения включенного состояния логарифмически стремится к предельной величине, определяемой плотностью критического заряда [16]. Поэтому расчет проделан для зависимости $v(j)$, описываемой выражением

$$v = \begin{cases} A(j - j_0)^{1/2}, & \text{если } j \leq 10^3 \text{ А/см}^2 \\ 10^4 \text{ А/см}^2, & \text{если } j > 10^3 \text{ А/см}^2. \end{cases} \quad (3)$$

3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 показаны зависимости тока и плотности тока на начальном этапе процесса включения при

трех различных значениях радиуса оптического окна r_0 . На всех кривых, представленных на рис. 3, хорошо видны все 3 участка, характерных для относительно локального включения тиристора большой площади. Это регенеративный участок, на котором ток нарастает со временем экспоненциально, участок „насыщения“, на котором нарастание тока замедляется и полевой процесс переноса носителей сменяется диффузионным, а также участок распространения включенного состояния, на котором плотность тока падает по мере увеличения включенной площади.

Для всех процессов, показанных на рис. 3, включение осуществлялось внесением в базу тиристора неравновесного заряда $q = 5q_{cr} = 1.95 \cdot 10^{-6}$ Кл/см². Для включения тиристора при минимальном радиусе r_0 (кривая 3) энергия, требуемая от источника света, включающего тиристор, в 16 раз меньше, чем в случае, соответствующем кривой 1. Однако, как и следовало ожидать, плотность тока в этом случае оказывается гораздо выше. Для кривой 3 значение плотности тока в максимуме j_{max} превышает 40 кА/см², что более чем в 6 раз превышает значение j_{max} для кривой 1.

Заметим, что значение $q = 5q_{cr}$ близко к оптимальной величине. При уменьшении q ($q \rightarrow q_{cr}$) сильно возрастает время задержки и возникает ситуация, когда структура включается не по всей площади окна, а в самых „слабых“ точках, т.е. в точках с минимальной величиной критического заряда. При этом плотность тока при включении многократно возрастает, что может привести к неконтролируемой деструкции прибора.

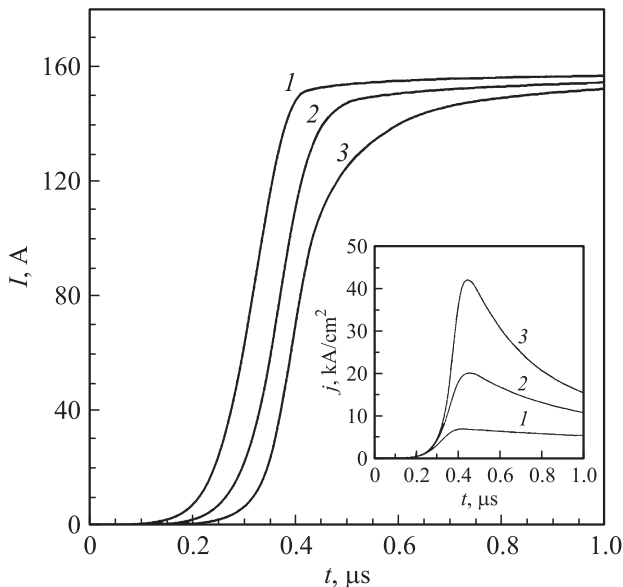


Рис. 3. Зависимости тока от времени при включении фототиристора при трех значениях радиуса оптического окна r_0 (рис. 1). r_0 , мкм: 1 — 800, 2 — 400, 3 — 200. Во всех случаях включение осуществляется внесением в базу тиристора неравновесного заряда $q = 5q_{cr} = 1.95 \cdot 10^{-6}$ Кл/см². На вставке показаны зависимости, соответствующие зависимостям плотности тока от времени в процессе включения.

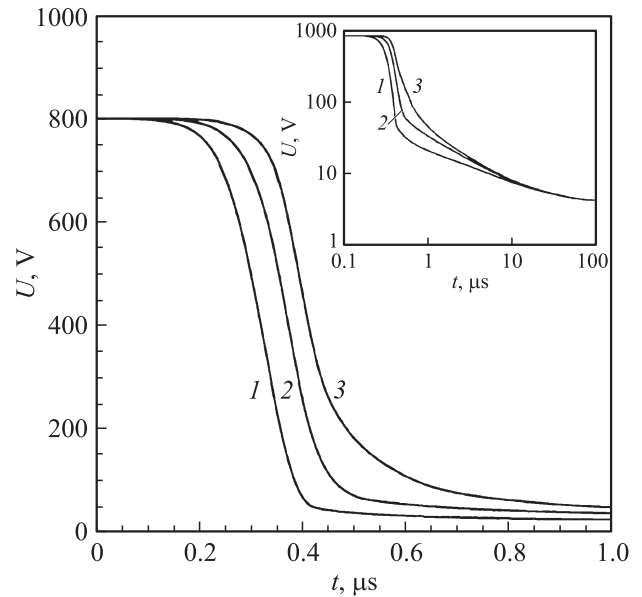


Рис. 4. Зависимости напряжения на тиристоре от времени в процессе включения и распространения включенного состояния при трех значениях радиуса оптического окна r_0 (ср. с рис. 1). r_0 , мкм: 1 — 800, 2 — 400, 3 — 200.

Хорошо известно, что с точки зрения включения эффективность заряда, введенного в тонкую легированную базу тиристора и в область объемного заряда (ООЗ), гораздо выше, чем эффективность равного заряда, введенного в толстую блокирующую базу [23]. При напряжении на структуре $U = 800$ В суммарная толщина тонкой базы и ООЗ составляет 68 мкм. Следовательно, при $q/q_{cr} = 5$ эффективное число носителей (на единицу площади), включающих тиристор в условиях, соответствующих рис. 3, составляет $\sim 1.22 \cdot 10^{13}$ см⁻². При длине волны включающего света $\lambda = 266$ нм (энергия фотонов $E_{ph} \approx 4.66$ эВ) импульсная энергия источника света в рассмотренном идеализированном случае должна составлять $\sim 9.1 \cdot 10^{-6}$ Дж/см². Если ограничиться первоначальным включением области с $r_0 = 200$ мкм, необходимая энергия составит $\sim 1.14 \cdot 10^{-8}$ Дж. При этом, однако, как видно из рис. 3, максимальная плотность тока j_{max} превышает 40 кА/см².

При небольшой площади первоначального включения велика не только максимальная плотность тока, но и величина остаточного напряжения на структуре после окончания быстрого регенеративного участка включения (рис. 4).

Так, для кривой 3 на рис. 3 при $t = 0.45$ мкс, когда плотность тока достигает значения $j_{max} = 42.2$ кА/см², остаточное напряжение на структуре (кривая 3 на рис. 4) составляет ~ 250 В. Сочетание большой плотности тока с большим значением напряжения на структуре приводит, как мы увидим далее, к очень сильному разогреву структуры. С другой стороны, для кривой 1 на рис. 3, соответствующей радиусу первоначального включения $r_0 = 800$ мкм, максимальная плотность тока j_{max}

составляет (при $t = 0.38$ мкс) 6.3 кА/см^2 . Остаточное напряжение в этот момент времени равняется $\sim 105 \text{ В}$. Таким образом, мгновенная максимальная плотность мощности различается для кривых 1 и 3 в ~ 16 раз, т.е. мгновенная максимальная плотность мощности оказывается обратно пропорциональной площади первоначального включения.

На рис. 5 показаны временные зависимости перегрева $\Delta T = T - T_0$ в самой нагретой центральной точке структуры ($r = 0$) в процессе включения и распространения включенного состояния (T_0 — температура окружающей среды).

Как и следовало ожидать, уровень перегрева чрезвычайно сильно зависит от площади первоначального включения. При радиусе первоначального включения $r_0 = 200$ мкм (кривая 3) расчетная температура в максимально нагретой точке структуры в конце процесса включения ($t \approx 0.8$ мкс, см. рис. 3) превышает 2000°C . В то же время при $r_0 = 800$ мкм (кривая 1) температура при $t \approx 0.8$ мкс составляет $\sim 100^\circ\text{C}$.

Разумеется, как и должно быть в рассматриваемой адиабатической модели, температура продолжает повышаться в течение всего процесса распространения. Однако интересно отметить, что чем больше площадь первоначального включения, тем относительно больший вклад в перегрев дает начальный этап процесса включения. Так, для режима, представленного кривой 3, при $t \approx 80$ мкс, когда включенное состояние заполняет всю площадь структуры, температура увеличивается от ~ 2000 до 2300°C , т.е. на $\sim 15\%$. В то же время для режима, представленного кривой 1, температура при

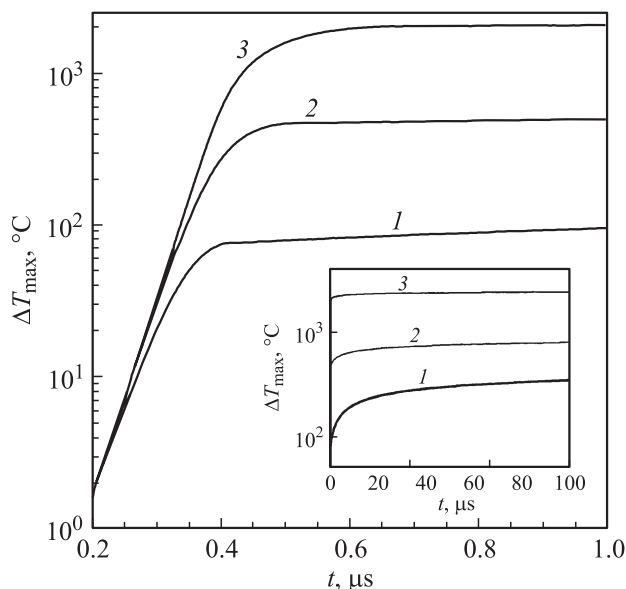


Рис. 5. Временные зависимости перегрева $\Delta T_{\text{max}} = T - T_0$ в самой нагретой центральной точке структуры ($r = 0$) в процессе включения. На вставке те же зависимости приведены для больших значений времени, соответствующих распространению включенного состояния на всю площадь фототиристора. r_0 , мкм: 1 — 800, 2 — 400, 3 — 200.

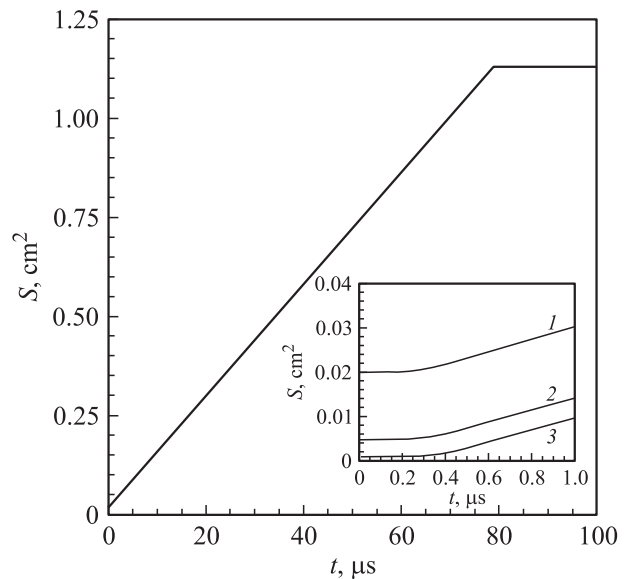


Рис. 6. Зависимости включенной площади тиристора от времени для исходного значения $r_0 = 800$ мкм. На вставке показано, как растет включенная площадь со временем в начале процесса включения для всех трех значений r_0 , использованных при расчете. r_0 , мкм: 1 — 800, 2 — 400, 3 — 200.

$t \approx 80$ мкс составляет $\sim 350^\circ\text{C}$, т.е. увеличивается более чем в 3 раза по сравнению с температурой в конце процесса включения при $t \approx 0.8$ мкс.

Грубая оценка максимальной плотности тока при включении „сверху“ может быть получена из очевидного условия $j_{\text{max}} \approx I_{\text{max}}/\pi r_0^2 \approx U_0/\pi r_0^2 R_l$. Такая оценка дает значение $j_{\text{max}} \approx 8 \cdot 10^3, 3 \cdot 10^4$ и 10^5 А/см^2 для кривых 1, 2 и 3 соответственно (ср. с вставкой к рис. 3). Представленные на рис. 5 результаты свидетельствуют о том, что во избежание недопустимого перегрева структуры полученное таким способом значение j_{max} не должно превышать $\sim (2-3) \cdot 10^4 \text{ А/см}^2$.

На рис. 6 показана зависимость включенной площади тиристора от времени для исходного значения $r_0 = 800$ мкм. Вставка на рис. 6 показывает, как растет включенная площадь со временем в начале процесса включения для всех трех значений r_0 , использованных при расчете.

Как видно из рис. 6, полное время распространения составляет ~ 80 мкс. То обстоятельство, что включенная площадь растет прямо пропорционально времени, является, конечно, прямым следствием выбранной зависимости $v(j)$ (см. выражение (2)). Поскольку площадь первоначального включения для всех трех случаев гораздо меньше полной площади структуры, размер включившейся площади и плотность тока практически совпадают для времен $t \geq 5$ мкс.

4. Заключение

В рамках адиабатической модели распространения включенного состояния в SiC-фототиристоре получены

результаты, позволяющие оценить перегрев структуры с учетом величины коммутируемого тока I_{\max} , скорости нарастания тока dI/dt , мощности/энергии используемого для коммутации UV источника света, площади, первоначально включаемой светом, и постоянной времени включения тиристора τ . Обоснована применимость адиабатического приближения при оценке перегрева структур. Процесс включения тиристора описывался с помощью компьютерной программы „Исследование“, позволяющей корректно учитывать полную совокупность нелинейных эффектов высокого уровня инжекции и высокого уровня легирования. Показано, что мгновенная максимальная плотность мощности приблизительно обратно пропорциональна площади первоначального включения тиристора. В соответствии с полученными оценками значение максимальной плотности тока при включении j_{\max} не должно превышать $\sim (2-3) \cdot 10^4$ А/см². Полученные данные позволяют для заданного напряжения, с которого включается структура, U_0 и выбранного сопротивления нагрузки R_l оценить радиус оптического окна r_0 .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. В Cree Inc. работа поддержана Mr. Charles Scozzie of Army Research Laboratory, Adelphi, Maryland USA.

Список литературы

- [1] D.H. Auston. Appl. Phys. Lett., **26**, 101 (1975).
- [2] J.H. Hur, R. Hadizad, S.G. Hummel, K.M. Dzurko, P.D. Dapkus, H.R. Fetterman, M.A. Gundersen. IEEE Trans. Electron Dev., **ED-37**, 2520 (1990).
- [3] G. Bickel, P. Heremans, M. Kuijk, R. Vounkx, G. Gorghs. Appl. Phys. Lett., **70**, 750 (1997).
- [4] V. Korobovand, V. Mitin. J. Appl. Phys., **79**, 1143 (1996).
- [5] J.-P.Jensen, W. Merz. Proc. 2003 Particle Accelerator Conf. (May 12–16 Portland Oregon, USA, 2003) p. 749.
- [6] В. Мартыненко, А. Хапугин, А. Гришанин, В. Чибиркин. Силовая электроника, № 5, 8 (2009).
- [7] M.E. Levinshtein, P.A. Ivanov, A.K. Agarwal, J.W. Palmour. Electron. Lett., **38**, 529 (2002).
- [8] M.E. Levinshtein, P.A. Ivanov, A.K. Agarwal, J.W. Palmour. Proc. 2002 Eur. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials ECSCRM2002. Linkoping, Sweden. Mater. Sci. Forum, **433–436**, 851 (2003).
- [9] S.L. Rumyantsev, M.E. Levinshtein, M.S. Shur, T. Saxena, Q.J. Zhang, A.K. Agarwal, J.W. Palmour. Semicond. Sci. Technol., **27**, 015 012 (2012).
- [10] N. Mapham. Electronics, **35**, 50 (1962).
- [11] N. Dheilily, G. Paques, S. Scharnholz, P. Bevilacqua, C. Raynaud, D. Nguyen, R.W. DeDoncker, D. Planson. Electron. Lett., **47**, 459 (2011).
- [12] N. Dheilily, G. Paques, S. Scharnholz, D. Planson. Abstracts 2011 Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials ICSCR-2011 (Cleveland, Ohio, USA, 2011) p. 409.
- [13] M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, T.T. Mnatsakanov, A.K. Agarwal, J.W. Palmour. In: SiC Materials and Devices, ed. by M.S. Shur, S.L. Rumyantsev and M.E. Levinshtein (World Scientific, Singapore, 2006) v. 1.
- [14] H.S. Carslow, J.C. Jager. Conduction of Heat in Solids (Oxford, 1959) [Г. Карслоу, Д. Егер. Теплопроводность твердых тел (М., Мир, 1964)].
- [15] Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe eds. M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur. (John Wiley & Sons, Inc. N.Y.–Singapore–Toronto, 2001).
- [16] М.И. Дьяконов, М.Е. Левинштейн. ФТП, **12**, 729 (1978).
- [17] M. Suzuki, N. Sowaki, K. Iwata, T. Nishinaga. IEEE Trans. Electron Dev., **ED-29**, 1222 (1982).
- [18] Q. Zhang, A. Agarwal, C. Capell, M. O’Loughlin, A. Burk, J.W. Palmour, V. Temple, A. Ogunniyi, H. O’Brein, C.J. Scozzie. Proc. 2011 Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials ICSCRM2011, September 11–16, Cleveland, Ohio, USA, (2011) p. 409.
- [19] T. Mnatsakanov, I. Rostovtsev, N. Philatov. Sol. St. Electron., **30**, 579 (1987).
- [20] M.E. Levinshtein, T.T. Mnatsakanov, P.A. Ivanov, J.W. Palmour, S.L. Rumyantsev, R. Singh, S.N. Yurkov. IEEE Trans Electron Dev., **48**, 1703 (2001).
- [21] M.E. Levinshtein, T.T. Mnatsakanov, P.A. Ivanov, R. Singh, J.W. Palmour, S.N. Yurkov. Sol. St. Electron., **48**, 807 (2004).
- [22] П.А. Иванов, М.Е. Левинштейн, Т.Т. Мнацаканов, J.W. Palmour, A.K. Agarwal. ФТП, **39**, 897 (2005).
- [23] A.I. Uvarov. In: Physics of Electron-Hole Junctions and Semiconductor Devices, eds S.M. Ryvkin, Yu.V. Shnartsev (New York, NY: Consultants Bureau, 1971) p. 170–179, 216–223.
- [24] M.E. Levinshtein, J.W. Palmour, S.L. Rumyantsev, R. Singh. IEEE Trans. Electron. Dev., **45**, 307 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

Overheating of optically triggered SiC thyristor during switch-on and turn-on spread

M.E. Levinshtein, T.T. Mnatsakanov*, S.N. Yurkov*, J.W. Palmour+

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

* All-Russian Electrotechnical Institute,
111250 Moscow, Russia
+ CREE Inc., 4600 Silicon Dr.,
Durham NC 27703, USA

Abstract A simple adiabatic model of spread of switch-on state in SiC optically triggered thyristor has been suggested. The model makes it possible to estimate overheating of the structure taking into account the switched current I_{\max} , dI/dt ramp, power/energy of UV light source used to switch a thyristor, and time constant of thyristor turn-on process. Validity of adiabatic approximation is discussed. It is demonstrated that the maximum instant power density is inversely proportional to the area of initial switched-on region of a thyristor. The estimates obtained show that maximum current density values in switch-on process should not exceed. Taking as an estimate $j_{\max} \approx I_{\max}/\pi r_o^2 \approx U_0/\pi r_o^2 R_l$, it is possible to estimate radius of the optical window r_0 at given anode bias U_0 and load resistance R_l .