

05;06;12

Кинетика пробойной электролюминесценции в $p-n$ -структурах на карбиде кремния

© А.М. Генкин, В.К. Генкина, Л.П. Гермаш

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", 252056 Киев, Украина

(Поступило в Редакцию 20 ноября 1998 г. В окончательной редакции 4 октября 1999 г.)

С помощью однофотонного статистического метода, обеспечивающего временное разрешение 0.25 ns, исследована кинетика пробойной электролюминесценции в светодиодах на основе карбида кремния в зависимости от особенностей структуры $p-n$ -перехода. Определены условия, при которых времена релаксации не превышают десятых долей ns и находятся за пределами временного разрешения регистрирующей системы.

Макетные образцы светодиодов (СД) на основе карбида кремния, работающих в режиме электрического пробоя, благодаря высокому быстродействию и стабильности издавна используются в генераторах световых импульсов нано- и субнаносекундной длительности, применяемых для имитации вспышек сцинтилляторов, контроля временных параметров фотоэлектронных умножителей [1]. Электролюминесценция в таких СД имеет широкий спектр, подобный спектру абсолютно черного тела при температуре 6000–8000 К. Она обусловлена в основном излучательными переходами высокоэнергетических носителей, получивших энергию в сильном электрическом поле обратносмещенного $p-n$ -перехода. Время пролета такими носителями области сильного поля не превышает 10^{-12} – 10^{-13} s, время термализации составляет величину порядка 10^{-10} s [2]. Ввиду этого можно предположить, что физическим ограничением быстродействия СД является величина не более 10^{-10} s. Теоретический анализ показывает [3], что быстродействие реальных СД может ограничиваться временем нарастания и спада тока лавины, которое зависит от величины барьерной емкости и других характеристик $p-n$ -перехода. Уверенное использование СД тормозится отсутствием достаточного объема экспериментальных исследований их временных характеристик. Препятствием для таких исследований являются, по-видимому, трудности методического характера, связанные с реализацией субнаносекундного временного разрешения в сочетании с достаточно высокой чувствительностью при измерении процессов релаксации излучения, а также с формированием субнаносекундных перепадов тока через исследуемые структуры.

В настоящей работе исследована кинетика пробойной электролюминесценции в слывных $p-n$ -структурах на основе карбида кремния в зависимости от особенностей структуры $p-n$ -перехода.

Измерения релаксации излучения СД проводились Я. Янсонсом в Институте физики твердого тела (Латвийский университет, Рига) по методике и на аппаратуре, разработанной сотрудниками этого института. Излучение СД регистрировалось микроканальным фотоэлектронным умножителем ФЭУ-165. С помощью

комплекта приборов статистического счета фотонов во времени [14] определялось распределение по времени появления числа одноэлектронных импульсов фотоэлектронного умножителя, соответствующих попаданию на фотокатод одиночных фотонов. Время появления отсчитывалось относительно стартового импульса, жестко "привязанного" к импульсу питания СД. В течение каждого цикла измерения регистрировалось время появления первых трех одноэлектронных импульсов. Количество циклов (10^6 – 10^8) выбиралось для обеспечения достаточно малой статистической погрешности. Временное разрешение установки (расстояние между соседними временными каналами) составляло 0.25 ns.

Для питания СД использовался ключ на мощном МДП (металл–диэлектрик–полупроводник) транзисторе КП 907А (способном переключать ток амплитудой до 2 А за время, меньшее 1 ns), управляемый каскадом на лавинном транзисторе ГТ 338Б с накопительной линией [5]. Формирователь работал в режиме внешнего запуска и обеспечивал получение на нагрузке 51Ω импульсов напряжения, близких к прямоугольным, с амплитудой, на несколько вольт меньшей напряжения питания оконечного каскада. Длительность импульсов определялась длиной накопительной линии и составляла 1–4 ns. Измеряемый СД подключался параллельно нагрузочному резистору 51Ω на выходе формирователя.

Для оценки разрешающей способности установки, выявления динамических помех определялась ее реакция на максимально короткий импульс излучения, который формировался карбид-кремниевым СД, работающим в режиме электрического пробоя, изготовленным в оптимальном варианте относительно длительности формируемых импульсов: сведена к минимуму величина реактивности СД, питание СД осуществлялось непосредственно от каскада на лавинном транзисторе с накопительной линией. Полученное нормированное распределение числа одноэлектронных импульсов по времени прихода $N(t)$ (в дальнейшем — измеряемый импульс излучения) представлено на рис. 1 кривой 10. Как видно, его длительность на полувысоте не превышает 0.5 ns, а на уровне 0.1 амплитуды — 0.7 ns. Спад импульса экспоненциальный с постоянной времени 0.15 ns в пределах

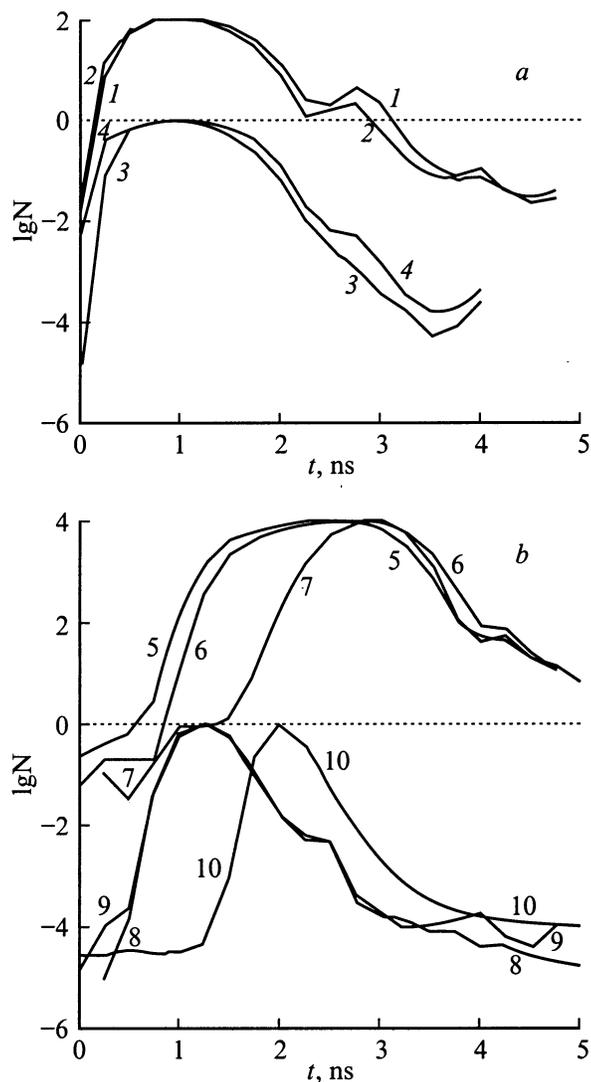


Рис. 1. Типичные измеряемые импульсы излучения для образцов первой и третьей групп. Диаметр $p-n$ -перехода 50 (а) и $200 \mu\text{m}$ (б) (кроме кривой 10). Длительность возбуждающего импульса 1 (1–4, 8, 9); 2 ns (5–7). Напряжение питания оконечного каскада формирователя 49.5 (1, 2, 5, 6, 8, 9), 20 (3), 30 (4), 29.5 V (7). Тип используемого светофильтра: 2, 5 — КС-14 (полоса пропускания > 640 nm); 6, 9 — УФС-2 (полоса пропускания 290 – 380 nm); 10 — измеряемый импульс минимальной длительности.

не менее 3 десятичных порядков. Динамический диапазон по интенсивности излучения составляет 4 порядка величины и ограничен помехами фотоэлектронного умножителя. Следовательно, все более длинные процессы, наблюдаемые при измерении релаксации пробной электролюминесценции, следует связывать не с реакцией измерительной системы, а с формой импульса излучения.

При наблюдении коротких процессов релаксации излучения в разных спектральных интервалах следует учитывать возможную зависимость характеристик системы регистрации от длины волны. Экспериментальная оценка

такой зависимости производилась нами путем сравнения формы и временного положения измеряемых импульсов, соответствующих одному и тому же импульсу излучения, полученных при использовании светофильтров, выделяющих различные спектральные полосы (все остальные условия измерения поддерживались одинаковыми). Как правило, наблюдалась небольшая задержка (на несколько десятых долей ns) без существенного изменения формы, импульса, соответствующего ультрафиолетовой компоненте излучения по сравнению с красной. Повидимому, этот эффект следует связать с соответствующей зависимостью от длины волны времени пролета электронов через умножительную систему ФЭУ-165. Аналогичная зависимость с крутизной около 1 ps/nm наблюдалась для многих типов фотоэлектронных умножителей [6].

Исследовались сплавные $p-n$ -структуры. Пробой в них, как правило, локализовался в микроплазмах, расположение и характеристики которых зависели от степени легирования, способа обработки поверхности исходных кристаллов, термовременного режима сплавления, массы и состава эмиттерного сплава, а также других факторов. При тщательно отработанных технологических режимах получались структуры, которые можно разделить на следующие группы.

Образцы первой группы изготавливались путем сплавления силуминовых дисков с кристаллами карбида кремния политипов 6H, 15R, выращенными по методу Лели. Диаметр структур составлял 150 – $300 \mu\text{m}$. Вплавление производилось в естественные грани кристаллов, перпендикулярные кристаллографической оси C . Концентрация некомпенсированных доноров в исходных кристаллах составляла 10^{18} – 10^{19}cm^{-3} . При условии искусственного внесения дефектов в приповерхностный слой исходных пластин $\alpha\text{-SiC}$ получались структуры, в которых микроплазмы густо и однородно заполняли всю площадь или локализовались внутри кольца, занимающего значительную часть площади $p-n$ -перехода. В оптимальном варианте напряжения включения микроплазм мало различались. На вольт-амперной характеристике появлению микроплазм соответствовал перегиб, предшествующий участку резкого возрастания тока. Высокая стабильность мощности излучения при постоянном токе в процессе длительной работы обеспечивалась для таких образцов на участке "резкого" пробоя, достаточно удаленном вверх по току от перегиба на вольт-амперных характеристиках [7]. Некоторые характеристики аналогичных образцов приведены в [8]. При отсутствии влияния дефектов получались структуры, в которых микроплазмы локализовались по окружности в районе периферии $p-n$ -перехода.

Вторую группу составляют образцы, получаемые при отсутствии влияния дефектов исходных кристаллов $\alpha\text{-SiC}$, имеющих сравнительно высокую степень легирования (более 10^{19}cm^{-3}), на локализацию микроплазм. $p-n$ -переходы наносились на углеродную грань кристаллов. Микроплазмы в таких образцах однородно

заполняют площадь $p-n$ -перехода, причем возрастание тока сопровождается значительным увеличением количества микроплазм. Напряжение включения микроплазм в 1.5–2 раза превышает рабочее напряжение образцов первой группы, получаемых на кристаллах с такой же степенью легирования. При пропускании прямого тока, превышающего 5–10 мА, у образцов второй группы наблюдалась однородная по площади инжекционная электролюминесценция, что не характерно для $p-n$ -структур первой группы с однородным полем микроплазм, которые обладали неоднородной по площади инжекционной электролюминесценцией лишь при пропускании импульсного тока с амплитудой, превышающей 0.5–1 А. Появление микроплазм в образцах второй группы связано, по-видимому, со статистическими флуктуациями концентрации нескомпенсированных примесных атомов в базовой области структур.

Образцы первой и второй группы размещались в корпусах от маломощных высокочастотных транзисторов. Контраст с p -областью осуществлялся путем термокомпрессионной сварки алюминиевой проволоки к капле эмиттерного сплава. Излучение выводилось через тонкую p -область. Емкость таких СД при нулевом смещении составляла 200–400 пФ, дифференциальное сопротивление при токах, превышающих 0.1 А, составляло 5–10 Ω . Рабочее напряжение СД зависело в основном от концентрации нескомпенсированных доноров в исходных кристаллах α -SiC и составляло при питании их стационарным током 0.1 А 15–27 В.

Третью группу составляли образцы с малой площадью $p-n$ -перехода, диаметром 40–50 μm [9]. Образцы размещались в коаксиальных корпусах диаметром 5 мм. Излучение выводилось через базовый кристалл α -SiC. Наблюдалась высокая стабильность таких СД в течение длительной работы при максимальной токовой нагрузке [10]. Емкость СД при нулевом смещении не превышала 20 пФ, дифференциальное сопротивление при токе 0.1 А составляло 10–30 Ω . Рабочее напряжение при токе 0.1 А составляло 18–30 В. Форма типичных импульсов, полученных для образцов первой и третьей группы, представлена на рис. 1.

Установлено, что при длительности импульса напряжения, формируемого на нагрузке 51 Ω , составляющей около 1 ns, значительная часть импульсного тока через образцы первой группы с однородным полем микроплазм идет на перезарядку емкости СД. Основную часть этой емкости составляет барьерная емкость $p-n$ -перехода, зависящая от величины обратного напряжения (возможно, и от скорости изменения напряжения). В связи с этим количество фотонов в импульсе излучения таких СД получается значительно меньшим, чем в случае использования образцов третьей группы с малой площадью $p-n$ -перехода. Как видно, при максимально допустимой рабочей величине напряжения питания окончательного каскада формирователя 49.5 В для образцов первой группы с однородным полем микроплазм при указанной длительности возбуждающего импульса характерны

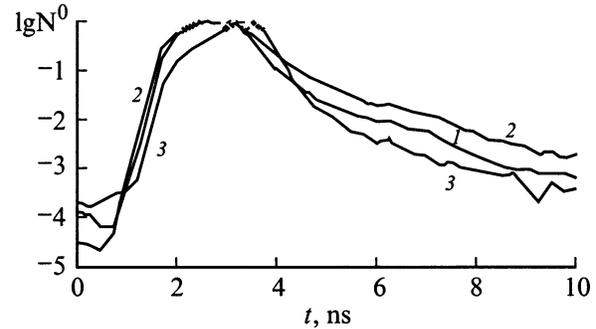


Рис. 2. Измеряемые импульсы излучения для образца третьей группы. 1 — интегральный свет (без светофильтра), 2 — светофильтр КС-14, 3 — УФС-2.

субнаносекундные измеряемые импульсы (кривые 8, 9). Форма этих импульсов слабо изменяется от образца к образцу. Более длинные импульсы, близкие по форме к возбуждающим импульсам напряжения, слабо зависящие от их амплитуды (определяемой напряжением питания окончательного каскада формирователя), наблюдаются у образцов третьей группы (кривые 3, 4). Зависимость формы импульсов от спектрального состава регистрируемого излучения практически не проявляется (кривые 1, 2, 5, 6, 8, 9).

Для наблюдения зависимости формы импульса излучения от уровня возбуждения в образцах первой группы необходимо было увеличить приблизительно до 2 ns длительность возбуждающего импульса напряжения. Как видно из рис. 1, *b* (кривые 5–7), при уменьшении уровня возбуждения длительность измеряемых импульсов уменьшается, что возможно объяснить возрастающим влиянием емкостного тока, который "съедает" переднюю часть импульса тока, обусловленного электрическим пробоем $p-n$ -перехода. Вследствие значительно меньшей величины барьерной емкости $p-n$ -перехода у образцов третьей группы указанный эффект для них практически не проявляется.

Для образцов первой группы на основе α -SiC, у которых микроплазмы локализовались по кольцу в районе периферии $p-n$ -перехода, получены импульсы, аналогичные образцам первой группы с однородным полем микроплазм.

Эффект зависимости времени релаксации пробойной электролюминесценции от спектрального состава регистрируемого излучения наблюдался для образца, представленного кривой 7, относящегося ко второй группе, изготовленного на основе SiC-15R с концентрацией нескомпенсированных доноров порядка 10^{19} cm^{-3} , имеющего диаметр $p-n$ -перехода около 300 μm . Измеряемые импульсы для этого образца (кривая 7) при длительности возбуждающего импульса напряжения около 2 ns и напряжении питания окончательного каскада формирователя 49.5 В представлены на рис. 2. Видно, что измеряемый импульс, соответствующий красной обла-

сти спектра (кривая 2), содержит в нарастании экспоненту с постоянной времени около 0.12 ns, колокообразную вершину. Спад начинается с экспоненты, имеющей протяженность один десятичный порядок, с постоянной времени приблизительно 0.5 ns и заканчивается хвостом с постоянной времени около 1.5 ns. Измеряемый импульс, соответствующий ультрафиолетовой области спектра (кривая 3), отличается остроконечной вершиной, соответствующей по времени концу возбуждающего импульса напряжения (по-видимому, процесс излучения не достигает насыщения). В нарастании появляется медленная компонента с постоянной времени 0.7 ns, а на спаде появляется быстрая компонента, имеющая протяженность около двух десятичных порядков, с постоянной времени 0.25 ns. Импульс, измеренный в интегральном свете (кривая 1) (область максимальной чувствительности ФЭУ-165 на уровне 0.5 соответствует диапазону 540–390 nm), содержит комбинацию описанных компонент. Для объяснения наблюдаемого, весьма сложного характера релаксации требуется проведение дополнительных комплексных исследований.

Таким образом, установлено, что сплавные $p-n$ -структуры на основе α -SiC, относящиеся к первой и третьей группам, можно использовать для формирования световых импульсов субнаносекундной длительности. Нет оснований полагать, что времена релаксации пробойной электролюминесценции в этих структурах превышают десятые доли ns. Однако значительная величина барьерной емкости структур с диаметром 150–300 μm создает трудности при формировании с их помощью световых импульсов, имеющих длительность менее 2 ns.

Процессы релаксации с длительностью более 1 ns, зависящие от спектрального состава регистрируемого излучения, выявлены в структурах, относящихся ко второй группе. От использования этих структур для формирования коротких световых импульсов, по-видимому, следует отказаться.

Список литературы

- [1] Рыжиков И.В., Рыкалин В.И., Лапшин В.Г. и др. // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. 1975. Вып. 20. С. 87–95.
- [2] Косяченко Л.А. // Учебн. записки Тартуского ун-та. 1983. Вып. 655. С. 12–33.
- [3] Мулюкин Н.В., Пронин Б.В. // ФТП. 1975. Т. 9. Вып. 6. С. 1065–1070.
- [4] Тибергс Я., Вейнберг Ю., Янсонс Я. и др. // Методы и аппаратура для физических исследований. Рига, 1989. С. 55–69.
- [5] Дьяконов В.П. // Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах. Справочник. М.: Радио и связь, 1994. С. 279.
- [6] Ветохин С.С., Гулаков И.Р., Перцев А.Н. // Одноэлектронные фотоприемники. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 161.

- [7] Алтайский Ю.М., Генкин А.М., Генкина В.К. // Электронная техника. Сер. 2. 1987. Вып. 4(190). С. 76–78.
- [8] Алтайский Ю.М., Генкин А.М. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 3. С. 543–545.
- [9] Алтайский Ю.М., Авраменко С.Ф., Генкин А.М. // ПТЭ. 1986. № 2. С. 245.
- [10] Белоус М.В., Генкин А.М., Генкина В.К. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 1. С. 130–132.