

## Спектры пробойной электролюминесценции $p-n$ -переходов на карбиде кремния

© М.В. Белоус, А.М. Генкин, В.К. Генкина, О.А. Гусева

Киевский политехнический институт Национальной академии наук Украины,  
252056 Киев, Украина

(Получена 17 октября 1995 г. Принята к печати 23 апреля 1996 г.)

Исследованы спектры пробойной электролюминесценции  $p-n$ -переходов с однородным и микроплазменным пробоем, изготовленных на кристаллах карбида кремния кубической модификации SiC-3C. В спектрах излучения отдельных микроплазм обнаружена при комнатной температуре явно выраженная периодическая структура, имеющая характер осцилляций с периодом 0.1–0.5 эВ. Амплитуда полос возрастает с ростом периода и при максимальной его величине превышает амплитуду фонового излучения. Аналогичная структура обнаружена также в спектрах отдельных микроплазм на SiC-6H. Предполагается, что структура обусловлена действием сильного электрического поля в области формирования излучения.

Пробойная электролюминесценция  $p-n$ -переходов на карбиде кремния исследуется уже в течение многих лет ввиду перспективности ее использования для создания высокостабильных широкополосных излучателей. В том числе, делались попытки объяснить спектральные особенности излучения [1–3], однако единая точка зрения на механизмы пробойного излучения к настоящему времени не выработана. Среди прочих причин, это связано, по-видимому, с отсутствием надежно установленных параметров зонной структуры для наиболее распространенных политипов карбида кремния (SiC-6H, 15R). В то же время для менее распространенной кубической модификации SiC-3C, ввиду ее наиболее простой кристаллической структуры, параметры зонной структуры установлены значительно более надежно, что уже позволило проинтерпретировать одну из полос пробойной электролюминесценции [1]. В связи с этим для установления механизмов пробойной электролюминесценции в карбиде кремния особый интерес представляет исследование SiC-3C.

Настоящая работа посвящена исследованию спектров пробойной электролюминесценции однородного и микроплазменного пробоя в структурах на основе SiC-3C и обнаруженных при этом новых явлений, которые выявлены также в SiC-6H.

Исследовались  $p-n$ -переходы, полученные сплавлением силумина в  $B$ -грань кристаллов SiC-3C, выращенных методом термического разложения метилтрихлорсилана, легированных азотом в процессе роста.  $p-n$ -переходы имели площадь порядка  $10^{-2}$  см<sup>2</sup>. Выбирались образцы с пробивным напряжением 6–30 В.

У большинства  $p-n$ -переходов наблюдался микроплазменный пробой, однако у ряда образцов при повышении тока вся плоскость  $p-n$ -переходов заполнялась свечением, которое при наблюдении под микроскопом с увеличением около 100 воспринима-

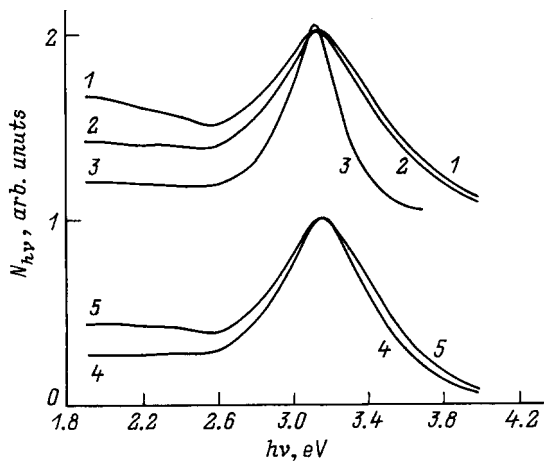
лось совершенно однородным. Некоторые образцы излучали однородно, без микроплазм.

При исследовании излучения образцов с микроплазменным пробоем обнаружено, что наряду с описанными в литературе свойствами спектры характеризуются дополнительными особенностями. Для изучения этих особенностей потребовалось выделять излучение малых участков  $p-n$ -перехода (с размерами менее 50 мкм), содержащих единичную микроплазму, или область однородного свечения. Для этого весь кристалл, кроме измеряемого участка, покрывался светопоглощающей краской.

Для регистрации спектров слабых потоков излучения (с интегральной мощностью  $10^{-10}$ – $10^{-9}$  Вт) от измеряемых образцов использовался светосильный монохроматор ЗМР-3. Приемником служил специально отобранный ФЭУ-79, используемый в одноэлектронном режиме. С целью обеспечения максимальной чувствительности при достаточно высоком спектральном разрешении измеряемый образец помещался непосредственно в плоскость входной щели монохроматора. Статистическая погрешность регистрации сигнала в пределах рабочего диапазона энергии фотона (1.8–4.0 эВ) с доверительной вероятностью 0.99 не превышала 1% на концах спектра и 0.5% в его центральной части. Величина нестабильности чувствительности фотоприемного тракта не превышала 1% в час. Измерение величины сигнала производилось с шагом 0.02 эВ.

Типичные спектры излучения  $p-n$ -переходов с однородным свечением, различающиеся величиной рабочего напряжения образца, а также уровнем возбуждения, измеренные при комнатной температуре, представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, спектр образцов с однородной пробойной электролюминесценцией содержит полосу с максимумом около 3.1 эВ на фоне широкополосного излучения.

Широкополосный фон очень слабо выражен в спектрах низковольтных  $p-n$ -переходов с пробивным на-



**Рис. 1.** Спектры пробной электролюминесценции  $p$ - $n$ -переходов на SiC-3C с однородным свечением. Образцы: 1 — (3), 2 — (16-2), 3 — (9), 4, 5 — (16-1). Режим питания: 1 — 30 мА, 30 В; 2 — 100 мА, 9.6 В; 3 — 100 мА, 8.3 В; 4 — 15 мА, 8.25 В; 5 — 60 мА, 10 В.

пряжением менее 10 В, в отличие от  $p$ - $n$ -переходов с напряжением пробоя, превышающим 20 В, для которых широкополосный фон вносит основной вклад в излучение. Возрастание доли широкополосного фона происходит также при повышении уровня возбуждения. Установлено, что зависимость формы спектра от уровня возбуждения выражена значительно сильнее у образцов с низковольтным пробоем.

Общепринятая интерпретация полосы 3.1 эВ, как излучения, связанного с прямыми переходами горячих электронов в зоне проводимости ( $X_{3c} - X_{1c}$ ) [1], не противоречит последним данным по энергетической зонной структуре SiC-3C [4,5]. Проведение детального анализа формы спектра, учитывающего различные типы электронных переходов (выполненного, например, для Si [6]), представляется в настоящее время невозможным из-за отсутствия надежно установленных количественных параметров зонной структуры SiC-3C. Однако связь излучения в полосе 3.1 эВ с переходами электронов практически не вызывает сомнений. В связи с этим существенное различие в поведении полосы 3.1 эВ и широкополосного фона при изменении условий возбуждения пробной электролюминесценции позволяет предположить участие переходов дырок в формировании широкополосного излучения. Наблюдается качественная корреляция доли широкополосного излучения с вероятным изменением количества свободных дырок в области  $p$ - $n$ -перехода. Аналогичные закономерности описаны ранее в [2,3].

В спектрах некоторых  $p$ - $n$ -переходов с микроплазменным пробоем, характеризующихся сравнительно низкими величинами рабочего выражения (в большинстве случаев менее 18 В), при комнатной температуре обнаружена явно выраженная структура,

имеющая характер осцилляций, накладывающихся на обычный спектр. Амплитуда и энергетическое положение осцилляций значительно различались от образца к образцу. Указанная структура слабо зависела от температуры образца в диапазоне 77–400 К. При изменении уровня возбуждения соотношение полос изменялось сложным образом. Попытка выявить области свечения  $p$ - $n$ -перехода, ответственные за проявление структуры, привела к необходимости выделения малых участков перехода, на которых, по визуальной оценке, присутствовало излучение одной светящейся "точкой" (условно мы будем называть такой объект отдельной микроплазмой). Спектры таких участков имели наиболее простой характер.

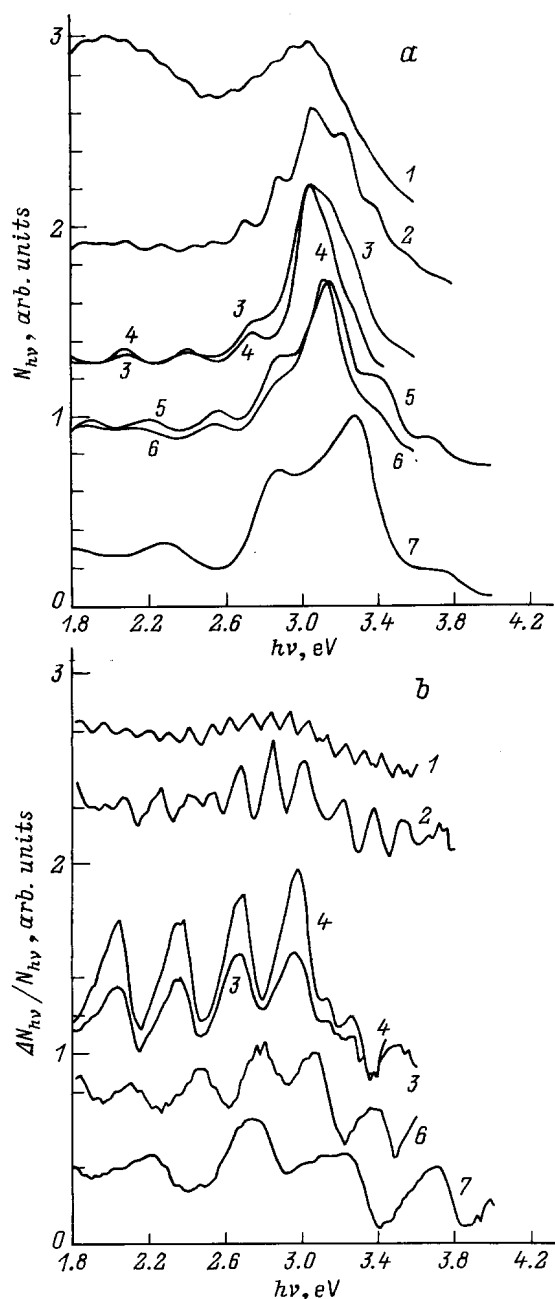
Ряд типичных спектров отдельных микроплазм при комнатной температуре представлен на рис. 2, а. Для дополнительного анализа осциллирующей структуры производилось дифференцирование спектров с шагом 0.02 эВ. Для каждой энергии фотона определялась относительная величина изменения спектральной плотности излучения. Соответствующие зависимости представлены на рис. 2, б.

Как видно из рисунков, полосы осциллирующей структуры охватывают практически весь спектральный диапазон, почти эквидистантны по энергии, период структуры в различных микроплазмах сильно различается (0.1–0.5 эВ). Амплитуда осцилляций по отношению к фоновому излучению приблизительно одинакова во всех участках спектра. Наблюдается корреляция между величиной периода и средней амплитудой полос, которая значительно возрастает с ростом последней. Спектры излучения с большим периодом осцилляций всегда характеризуются преобладающим вкладом полосы 3.1 эВ на фоне слабого широкополосного излучения.

Четкая корреляция между периодом структуры и величиной рабочего напряжения  $p$ - $n$ -перехода не выявлена. Например, на рис. 2 (кривые 1, 2) приведены спектры микроплазм, присутствующих на одном  $p$ - $n$ -переходе, при одном и том же режиме питания образца. Однако отмечено, что наличие структуры с максимальным периодом и амплитудой более вероятно для образцов, полученных на кристаллах с более высоким уровнем легирования и, соответственно, более низковольтным пробоем. Для таких образцов можно ожидать более высокой напряженности электрического поля в микроплазмах.

При изменении уровня возбуждения  $p$ - $n$ -перехода, несмотря на существенное изменение общего характера спектра, энергетический сдвиг полос осциллирующей структуры практически не наблюдается (рис. 2, кривые 3, 4).

Полосы осциллирующей структуры подвержены значительной, весьма быстрой деградации (существенная деградация наблюдается за время наработки, исчисляемое часами). Деградация максимальна



**Рис. 2.** Спектры излучения отдельных микроплазм в  $p-n$ -переходах на SiC-3C (a), продифференцированные спектры (b). Образцы: 1 — (135-1), 2 — (135-2), 3, 4 — (11-4), 5, 6 — (11-10), 7 — (11-6). Напряжение на образце, В: 1, 2 — 18, 3 — 11.83, 4 — 6.64, 5, 6 — 14.3, 7 — 18. Время наработки образца, ч: 5 — 0, 6 — 8.

для микроплазм с большим периодом и интенсивностью полос. Вместе с полосами осциллирующей структуры, но более медленно, гаснет фоновое излучение. Синхронно с уменьшением квантового выхода излучения уменьшается при постоянном токе напряжение на  $p-n$ -переходе. Скорость деградации, как правило, значительно уменьшается при питании образцов в режиме стабилизации не тока, а

напряжения. Типичный характер изменения спектра излучения микроплазмы в процессе наработки представлен на рис. 2 (кривые 5, 6). Встречаются также более сложные случаи изменения структуры спектра в процессе работы  $p-n$ -перехода, характерные для микроплазм с большим периодом структуры. В этих случаях наблюдается изменение энергетического положения и перераспределение относительной интенсивности полос. Деградация в период хранения образцов практически отсутствует.

Следует отметить, что периодическая структура спектров пробойной электролюминесценции наблюдалась нами только в излучении некоторых низковольтных микроплазм. Многочисленные попытки обнаружить проявление указанной структуры в излучении  $p-n$ -переходов с однородным свечением, в том числе и при плотности тока, превышающей  $10^5 \text{ A/cm}^2$ , при питании образца в импульсном режиме, а также в излучении микроплазм с пробивными напряжениями более 20 В к успеху не привели.

Важным представляется наблюдение аналогичной периодической структуры в спектрах  $p-n$ -переходов, изготовленных на основе других политипов SiC. Нами обнаружена указанная структура в спектрах излучения отдельных микроплазм в сплавных  $p-n$ -переходах на основе SiC-6H. Для создания образцов использовались пластины SiC-6H, выраженные по методу Лели, легированные азотом в процессе роста до концентрации нескомпенсированных доноров, превышающей  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ .  $p-n$ -переходы создавались на гранях, перпендикулярных кристаллографической оси С. Пробивное напряжение образцов не превышало 10 В и соответствовало, по-видимому, области туннельного пробоя [7].

Спектры двух микроплазм в  $p-n$ -переходах на основе SiC-6H, различающихся величиной периода структуры, измеренных при комнатной температуре, представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, основные черты структуры в SiC-6H и SiC-3C аналогичны.

Нам не известны примеры проявления в спектрах излучения полупроводниковых структур осцилляций, подобных наблюдаемым нами. По ряду качественных особенностей — слабой температурной зависимости, периодичности по энергии, корреляции между периодом и амплитудой — эти осцилляции наиболее сходны с теми, что наблюдались в спектрах поглощения вблизи края в присутствии однородного электрического поля в CdS [8] и GaAs [9,10]. При этом обсуждалась возможность их интерпретации, как проявления уровней Ванье-Штарка. Вопрос о природе этих осцилляций, по-видимому, остался открытым, в то время как более поздние теоретические и экспериментальные исследования проявления уровней Ванье-Штарка связаны главным образом с искусственными периодическими структурами (например, [11,12]).

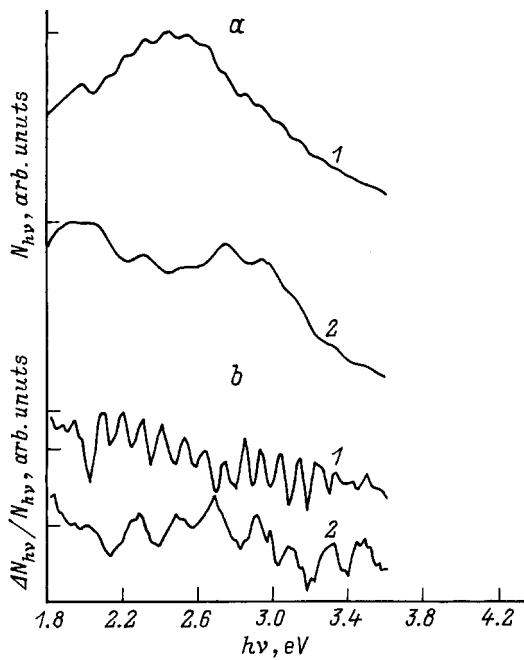


Рис. 3. Спектры излучения отдельных микроплазм в  $p$ - $n$ -переходах на SiC-6H (а), продифференцированные спектры (б). Образцы: 1 — (209), 2 — (107). Напряжение на образце, В: 1 — 14.3, 2 — 8.8.

При отмеченном качественном сходстве наблюдаемые нами осцилляции имеют принципиальные количественные отличия — на порядки большие периоды и амплитуду, а главное, они охватывают очень широкий спектральный диапазон.

Тем не менее полезно оценить величину электрического поля, которое соответствовало бы в модели Ванье-Штарка наблюдаемым осцилляциям. Напряженность электрического поля  $E = \Delta h\nu/a$ , где  $\Delta h\nu$  — период осцилляций,  $a$  — постоянные решетки, должна была бы достигать значений  $(2-10) \cdot 10^6$  В/см в SiC-3C и  $(3-7) \cdot 10^6$  В/см в SiC-6H. Учитывая данные о величине  $E_{\max}$  в SiC-6H [13], такие поля представляются реальными. Возможно объяснить в этом случае и быструю деградацию перехода в микроплазмах с наибольшими периодами осцилляций, а значит, и с максимальными полями.

Однако такая модель должна базироваться на предположении, что все излучение формируется в области почти однородного поля, что представляется маловероятным. Само же по себе предположение о влиянии сильного электрического поля в области формирования излучения на структуру состояний, с нашей точки зрения, нельзя отбрасывать, тем более, что поля в области перехода в SiC достигают величин, на порядки превышающих те, что достигимы в известных экспериментах по электропоглощению и электроотражению, где такое влияние хорошо

известно (эффект Франца-Келдыша, уровни Ванье-Штарка).

В любом случае очевидно, что исследование спектров излучения отдельных микроплазм и, в том числе, обнаруженной в них осциллирующей структуры представляет самостоятельный интерес, а также может дать новую информацию как о структуре переходов, так и о механизмах пробойного излучения.

## Список литературы

- [1] А.М. Генкин, В.Н. Родионов. ФТП, **13**, 789 (1979).
- [2] А.О. Константинов. ФТП, **21**, 670 (1987).
- [3] Л.А. Косяченко, А.В. Пивовар, В.М. Склярчук. ЖПС, **36**, 236 (1982).
- [4] W.R.L. Lambrecht, W.R. Segall, W. Suttrop. Appl. Phys. Lett. **63**, 2747 (1993).
- [5] M. Rohlfing, P. Kruger, J. Pollmann. Phys. Rev. B, **45**, 17791 (1992).
- [6] J. Bude, N. Sanco, A. Yoshii. Phys. Rev. B, **45**, 5848 (1992).
- [7] Ю.М. Алтайский, А.М. Генкин, В.К. Генкина, Л.Г. Огнева. Электрон. техн., сер. 2, вып. 4 (190), 76 (1987).
- [8] В.С. Вавилов, В.Б. Стопачинский, В.Ш. Чанбарисов. ФТТ, **8**, 2660 (1965).
- [9] B.T. French. Phys. Rev., **174**, 991 (1968).
- [10] R.W. Koss, L.M. Lambert. Phys. Rev. B, **5**, 1479 (1973).
- [11] K. Gibb, M.M. Dignam, J.E. Sipe et al. Phys. Rev. B, **48**, 8156 (1993).
- [12] K. Niizeki, A. Matsumura. Phys. Rev. B, **48**, 4126 (1993).
- [13] Ю.А. Водаков, А.О. Константинов, Д.П. Литвин, В.И. Санкин. Письма ЖТФ, **7**, 705 (1981).

Редактор В.В. Чалдышев

## Breakdown electroluminescence spectra of silicon carbide $p$ - $n$ -junctions

M.V. Belous, A.M. Genkin, V.K. Genkina, O.A. Guseva

Kiev Polytechnical Institute,  
252056 Kiev, Ukraine

**Abstract** Breakdown electroluminescence spectra of SiC-3C  $p$ - $n$ -junctions with both homogeneous and microplasma breakdowns have been investigated. A pronounced periodic structure has been found in radiation spectra of isolated microplasmas at room temperature. This structure has the form of oscillations with a period of 0.1–0.5 eV. Amplitudes of bands increase as the period increases and exceed the amplitude of the background radiation at the period maximal value. A similar structure has been also discovered in spectra of isolated microplasmas in SiC-6H. The structure is assumed to be caused by an action of a high electric field within the emitting region of the junction.