

# Гигантский всплеск ударной ионизации в $p-n$ -переходе политипа $6H-SiC$

© В.И. Санкин<sup>†</sup>, П.П. Шкребий

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

(Получена 21 февраля 2008 г. Принята к печати 3 марта 2008 г.)

Исследование электронного компонента ударной ионизации в  $p^+-n^- - n^+$ -переходе политипа  $6H-SiC$  привело к обнаружению гигантского всплеска ударной ионизации и возникновению сверххранного лавинного пробоя. Электрическое поле такого пробоя на  $\sim 20\%$  меньше электрического поля пробоя, возникающего при монотонном развитии ударной ионизации. Интересно, что это происходит внезапно, без каких-либо видимых признаков, в частности без возрастания темнового тока, характерного для предпробойного состояния  $p-n$ -перехода. Условия возникновения необычного пробоя и его свойства позволили сделать предположение о нелинейных процессах, приводящих к образованию стримера. В плоскости  $p-n$ -перехода данный эффект выглядит как светящийся трек шириной  $\sim 10$  мкм. Эффект происходит в режиме ванье-штарковских лестниц состояний. Последний может стимулировать локальное накопление заряда и образование стримерной структуры.

PACS: 73.50.Mx, 73.40.Lq

## 1. Введение

Карбид кремния является ярким представителем полупроводников со сверхструктурой. В них, кроме основной кристаллической структуры, можно выделить дополнительную периодичность с периодом вплоть до нескольких десятков постоянных решетки. Такая периодичность получила название естественной сверхрешетки (ЕСР). Как известно, полупроводники со сверхрешеткой (СР) представляют собой наиболее удобные объекты для наблюдения различных эффектов, обусловленных явлением ванье-штарковской локализации (ВШЛ) [1]. Физическую суть этого явления можно продемонстрировать на примере одномерной кристаллической структуры, упрощенного аналога сверхрешетки, к которой приложено электрическое поле (рис. 1). Под действием возрастающего поля происходит трансформация квазинепрерывного электронного спектра сначала в дискретный и затем в набор уровней, локализованных в отдельных потенциальных ямах. Хотя изучение электрического транспорта в таких объектах находится в начальном состоянии, тем не менее можно сказать, что разогрев электронов в такой системе существенно затруднен. Главная особенность SiC состоит в том, что ЕСР — собственное свойство политипов SiC, и ВШЛ оказывает влияние на различные процессы в кристаллах SiC, которые происходят в сильных электрических полях. Одним из таких процессов является ударная ионизация (УИ). Как было показано ранее [2,3], ВШЛ радикально изменяет процесс УИ в SiC, подавляя электронный компонент. Эти исследования показали, что в широком диапазоне полей доминирует дырочный компонент ударной ионизации, и вплоть до полей, составляющих 90% от пробойного, не удалось достоверно зарегистрировать наличие электронного компонента

ударной ионизации [4]. Единственным доказательством возникновения электронного компонента ударной ионизации в политипах карбида кремния является наличие лавинного пробоя, который невозможен при наличии лишь одного компонента ударной ионизации [5]. Однако некоторые особенности механизма электронного компонента УИ ранее не получили детальной интерпретации, в частности остался не вполне понятным механизм резкого перехода электронного компонента УИ из депрессивного состояния в широкое диапазоне полей в состояние паритета с дырочным компонентом в предпробойной области. Оставались невыясненными такие важные характеристики, как значение параллельного электрического поля, при котором возникает электронный компонент ударной ионизации, абсолютные значения коэффициентов УИ и механизм разогрева электронов.

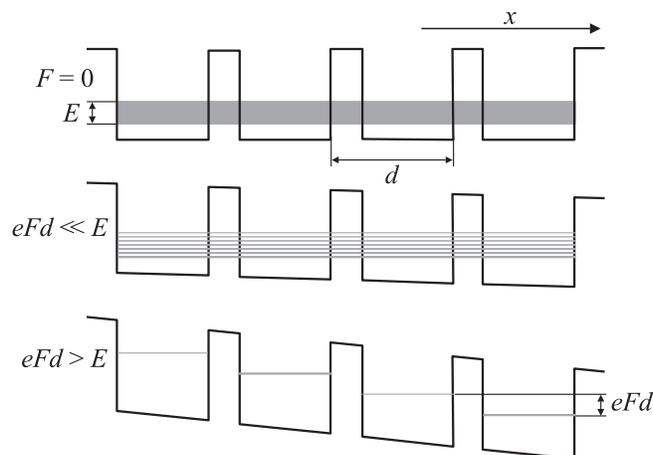


Рис. 1. Ванье-штарковская трансформация электронного спектра в одномерной сверхрешетке.  $F$  — электрическое поле,  $d$  — период сверхрешетки.

<sup>†</sup> E-mail: Sankin@mail.ioffe.ru

Для получения ответов на эти вопросы необходимо реализовать прямое наблюдение электронного компонента ударной ионизации. Отметим, что превышение дырочного компонента над электронным компонентом ударной ионизации составляет по данным исследования лавинного шума более 2 порядков [6]. Поэтому для наблюдения указанных процессов с помощью методики фотоумножения необходимо создать преобладание электронного компонента над дырочным в инициирующем фототоке больше чем в 100 раз, что до сих пор не удавалось по причинам технологического свойства. В данной работе сделана попытка реализовать экспериментальные условия, необходимые для решения указанных задач.

Согласно единственной теоретической работе [7], разогрев электронов в полупроводниках со сверхрешеткой должен стимулироваться повышением температуры. Правда, этот разогрев происходит в нижней минизоне, что недостаточно для набора ионизационной энергии. Однако четко установленный ранее факт падения напряжения лавинного пробоя с повышением температуры [2,3] однозначно указывал на то, что температура должна стимулировать скорость УИ и, скорее всего, ее электронного компонента. В работе показано, что интенсивность дырочного компонента УИ падает с повышением температуры. Задача данной работы состояла в том, чтобы, используя максимально чистый электронный ток и повышенные температуры, попытаться выйти в область максимально чистой электронной ионизации и детально проанализировать узкую, менее 10% от пробойного поля, область электрических полей, где перед пробоем должен возникать электронный компонент ударной ионизации.

## 2. Методика эксперимента

Технологически задача создания экспериментальных структур на SiC в своей основе сводится к росту качественных эпитаксиальных слоев одного и того же политипа. Подчеркнем, что ЕСР не содержит интерфейсных слоев, характерных для гетеропереходных сверхрешеток.

На строго ориентированную подложку 6H-SiC с базальной плоскостью 0001 и с концентрацией  $N_d - N_a \approx (3-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  наращивался эпитаксиальный слой  $n$ -типа проводимости с концентрацией  $N_d - N_a \approx 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  толщиной  $\sim 2 \text{ мкм}$ , а на него эпитаксиальный слой  $p^+$ -типа, легированного Al, причем с относительно низкой концентрацией акцепторов  $N_d - N_a \approx \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что на 2 порядка ниже, чем в  $p$ - $n$ -структурах, использованных в предыдущих работах [2,3,5,6]. Благодаря этому в  $p$ -слое удалось увеличить диффузионную длину электронов до 1 мкм. Это позволяло при соответствующей длине волны возбуждающего света обеспечить преобладающую генерацию электронно-дырочных пар в  $p$ -слое, из которого электроны диффузией доставлялись в область сильного

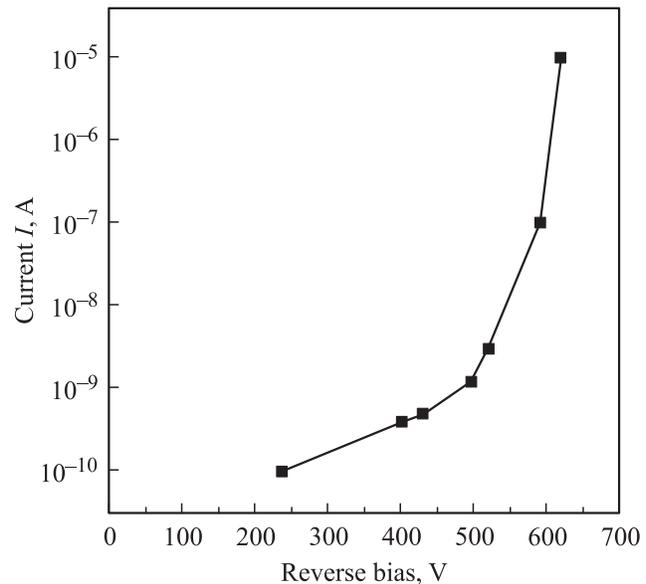


Рис. 2. Обратная вольт-амперная характеристика  $p^+ - n^- - n^+$ -структуры на основе 6H-SiC.

поля  $p$ - $n$ -перехода. Однако подчеркнем, что небольшое число электронно-дырочных пар генерировались в пределах  $p$ - $n$ -перехода и в  $n$ -области, поэтому реальное преобладание электронного компонента составляет около 150 раз.

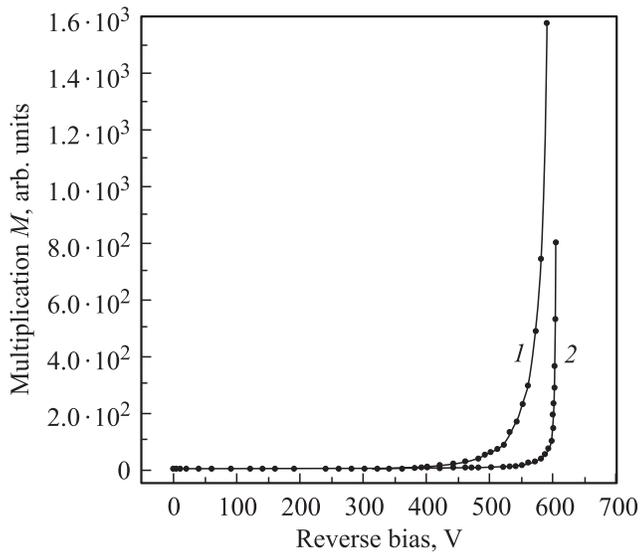
Фотолитографией и последующим травлением формировались меза-структуры диаметром 400–300 мкм с оптическим окном, точечным контактом на периферии базальной плоскости и фоторезистивным покрытием в качестве антипробойного протектора, который наносился на специально подготовленную боковую поверхность.

Исследование характера УИ проводилось с помощью измерения зависимости фототока короткого замыкания в  $p$ - $n$ -переходе при изменении внешнего напряжения от 0 до величины напряжения пробоя.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных микроструктур позволяли рассчитывать на максимальное приближение рабочего режима к точке пробоя (рис. 2).

## 3. Экспериментальные результаты

Данные по фотоумножению при  $T = 300 \text{ К}$  представлены на рис. 3. Кривая 1 получена при небольшом преимуществе электронного компонента фототока над дырочным компонентом. Но, согласно более ранним результатам, такие кривые формируются в основном дырочным фотоумножением [3]. Это убедительно подтверждает кривая 2, полученная при подавляющем, примерно 150/1, преимуществе электронного фототока. Вплоть до полей 0.95 от величины пробойного поля  $F_b$  на этой кривой не наблюдается каких-либо признаков умножения фототока, что свидетельствует об



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента умножения в  $p^+-n^- - n^+$ -переходе на основе  $6H-SiC$  от внешнего напряжения: 1 — дырочное умножение; 2 — преобладание электронов в начальном фототоке более 2 порядков.  $T = 300$  К.

отсутствии электронного компонента УИ. Это первое прямое наблюдение эффекта подавления электронного компонента УИ в ECP  $6H-SiC$ . Однако следует заметить, что начало фотоумножения на кривой 2 расположено в области полей, где дырочное фотоумножение заметно перекрывает начальный дефицит дырочного компонента фототока. Поэтому пока достоверно говорить об электронной составляющей фотоумножения в этой области полей нельзя. Чтобы прояснить данную коллизию следует обнаружить изменения на кривой 2 при повышении температуры.

Результат воздействия температуры на кривую 1 (рис. 3) показал, что с ростом температуры дырочное умножение падает, и это соответствует классическому разогреву носителей заряда в квазинепрерывном спектре.

Что касается результата воздействия температуры на кривую 2 (рис. 3), то он был абсолютно неожиданным. Вследствие стечения обстоятельств, а именно повышения температуры до  $100^\circ\text{C}$  и существенного увеличения начального фототока за счет роста поглощения в непрямозонном  $SiC$ , был обнаружен необычайно большой всплеск УИ (рис. 4), приводящий к развитому лавинному пробую при среднем поле в  $1400$  В/см, что почти на 20% меньше среднего пробойного поля в данном конкретном образце. Интересно, что это происходит без каких-либо видимых признаков, в частности без возрастания темнового тока, характерного для предпробойного состояния  $p-n$ -перехода. Более того, в образце с повышенным уровнем темнового тока получить этот эффект гораздо сложнее или невозможно. Для возникновения этого эффекта необходимо превысить определенный уровень фототока и температуры.

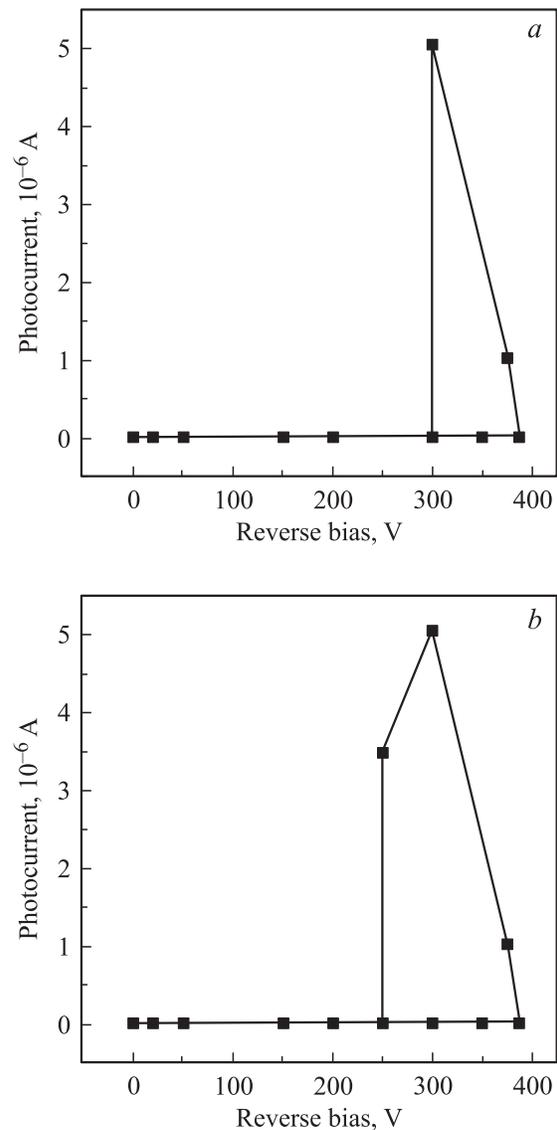
Характерные особенности:

1. При повышении температуры порог фототока понижается.

2. Пороговый фототок спектрально зависимый. Наименьший порог характерен для кванта света, близкого к ширине запрещенной зоны. Зарегистрированное отношение максимального фототока к минимальному  $\sim 100$ .

Собственные свойства аномального пробоя:

1. Наблюдалось 2 варианта поведения пробойного тока при выключении освещения: пробойный ток выключается с прекращением освещения (рис. 4, *a*) либо пробойный ток не выключается с прекращением освещения. В последнем случае наблюдается большой гистерезис: напряжение выключения меньше напряжения включения на несколько десятков вольт (рис. 4, *b*).



**Рис. 4.** Эффект сверхнапряженного пробоя в  $p^+-n^- - n^+$ -переходе на основе  $6H-SiC$ : *a* — фототок выключается сразу после выключения освещения; *b* — фототок не выключается после выключения освещения.

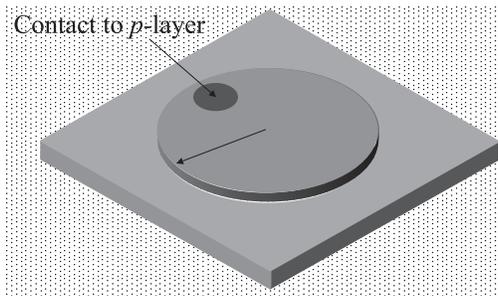


Рис. 5. Плазменный трек сверххранного пробоя.

2. В обоих случаях имеет место отрицательная дифференциальная проводимость.

3. Визуально пробой представляет собой светящийся тонкий трек с точкой размером около 10 мкм, смещенной от центра меза-структуры, пульсирующий или неподвижный в плоскости  $p-n$ -перехода (рис. 5).

Заметим, что величины пороговых фототоков были ничтожны в сравнении с рабочими токами в приборных структурах. Их плотность лежала в области  $10^{-7}$ – $10^{-5}$  А/см<sup>2</sup> в зависимости от спектральной области.

В настоящее время можно предполагать, что данная аномалия есть следствие нелинейного процесса. Особенностью нелинейных эффектов является непредсказуемость и неожиданность, поскольку их возникновение происходит вследствие обычно ничтожных по своей амплитуде скрытых процессов, имеющих в своей основе сильную нелинейную составляющую, которая и стимулирует нарастание флуктуаций с определенным волновым вектором и последующее структурирование основного процесса. По-видимому, к этому классу явлений может быть отнесен и обнаруженный нами эффект, поскольку ни один параметр ВАХ  $p-n$ -перехода не указывал на отклонение от нормы и на возможность необычайно большого всплеска ударной ионизации, приводящего к развитому лавинному пробоя при среднем поле на 20% меньше пробойного поля в данном конкретном образце. Величины напряжения собственного пробоя и сверххранного пробоя были соответственно 620 В (рис. 2) и 380–400 В (рис. 4, *a, b*). К этому надо добавить, что этот необычный пробой сохраняется и при напряжении на 100–120 В меньше порогового, т. е. при напряжении 280–300 В, что соответствует понижению пробойного поля на 40–45% (рис. 4, *b*).

Интересно, что этот эффект, возникающий при фотовозбуждении, чрезвычайно чувствителен к внутренним характеристикам  $p-n$ -переходов и к параметрам внешнего воздействия: температуре, уровню фототока, величине поля, спектральному составу фотовозбуждения. В частности, то, что этот эффект возникает в процессе ударной ионизации, происходит с образованием плазменного трека с характерным поведением и в образце с характерными параметрами ВАХ, позволяет

предполагать возникновение стримерного пробоя. Для возникновения такого пробоя необходимо соблюдение некоторых пороговых условий, а именно образование зародыша критического размера [8]. Это приводит к концентрации и значительному повышению электрического поля вблизи такого зародыша и снижению за счет этого среднего пробойного поля. Возможно, с процессом образования зародыша связана и чувствительность эффекта к внешним параметрам и качеству  $p-n$ -перехода. Интересно, что по всем данным этот эффект происходит в режиме ванье-штарковских лестниц. Представляется весьма вероятным, что этот режим стимулирует образование стримерной структуры, потому что следствием этого режима является падение подвижности. Последнее препятствует стоку заряда и, напротив, способствует накоплению его в структуре стримера, увеличивая электрическое поле вблизи головки стримера до пробойного и выше пробойного. Движение стримера происходит не в нижней минизоне, а в вышележащей, где сохраняется квазинепрерывность спектра и достаточно высокая подвижность носителей заряда. Представляется весьма перспективным найти физическое объяснение механизма, стимулирующего спонтанное возникновение этого эффекта, не имеющего аналога в полупроводниковых структурах.

К сожалению, возникновение данного эффекта не позволило выявить поведение кривой 2 (рис. 3) при повышении температуры. Поэтому приходится пока ограничиться констатацией отсутствия электронного умножения до электрических полей, всего лишь на 5% меньших пробойных при  $T = 300$  К. Последнее является уникальным свойством ЕСР политипа  $6H-SiC$ , которое не имеет аналогов в других полупроводниках. Как известно, это свойство может обеспечить минимальный уровень лавинного шума в лавинных  $6H-SiC$ -фотодиодах и, следовательно, высокую эффективность таких приборов ультрафиолетового диапазона.

## 4. Заключение

Следует обратить внимание на следующие результаты.

1. Прямым наблюдением установлена монополярность умножения в  $6H-SiC$  в широком диапазоне электрических полей. Показано, что вплоть до электрических полей, составляющих  $0.95F_b$ , не наблюдается электронный компонент ударной ионизации.

2. В политипе SiC с естественной сверхрешеткой обнаружен эффект сверххранного пробоя.

3. По совокупности признаков данный эффект может быть связан с возникновением стримерного пробоя. Если это так, то имеет место первое наблюдение стримера в  $p-n$ -переходе.

4. Принципиальный интерес связан с возникновением эффекта сверххранного пробоя в режиме ванье-штарковских лестниц.

5. Сохранение состояния лавинного пробоя при уменьшении поля более чем на 40%.

6. Обнаружение данного эффекта и результаты его исследования представляют большой практический интерес, связанный с учетом влияния его на работу широкого класса приборов на основе SiC и с созданием новых приборов сверхбыстрой генерации и усиления, поскольку стримеры имеют необычайно высокую скорость распространения — более  $10^8$  см/с [9].

Работа поддержана подпрограммой № 2 „Влияние атомно-кристаллической и электронной структуры на свойства конденсированных сред“; программами фундаментальных исследований президиума РАН: П-03 „Квантовая макрофизика“, проект 2.17; „Нанокристаллические свойства микроструктур на основе политипов SiC“.

## Список литературы

- [1] G.N. Wannier. Phys. Rev., **11**, 432 (1960).
- [2] А.П. Дмитриев, А.О. Константинов, Д.П. Литвин, В.И. Санкин. ФТП, **17**, 1093 (1983).
- [3] Ю.А. Водаков, Д.П. Литвин, В.И. Санкин, Е.Н. Мохов, А.Д. Роенков. ФТП, **19**, 814 (1985).
- [4] V.I. Sankin. Mater. Sci. Forum, **457–460**, 701 (2004).
- [5] В.И. Санкин. ФТП, **36**, 769 (2002).
- [6] В.И. Санкин, Ю.А. Водаков, Д.П. Литвин. ФТП, **18**, 2184 (1984).
- [7] Р.А. Сурис, Б.С. Щамхалова. ФТП, **18**, 111 (1984).
- [8] М.И. Дьяконов, В.Ю. Качоровский. ЖЭТФ, **94**, 321 (1988).
- [9] Н.Г. Басов, А.Г. Молчанов, А.С. Насибов, А.З. Обидин, А.Н. Печенов, Ю.М. Павлов. Письма ЖЭТФ, **19**, 650 (1974).

Редактор Т.А. Полянская

## Gigantic splash of impact ionization in $6H$ -SiC polytype $p-n$ junction

V.I. Sankin, P.P. Shkrebiy

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

**Abstract** Investigation of electron component of impact ionization in the  $6H$ -SiC  $p^+-n^- - n^+$  junction allowed to discovery of gigantic splash of the impact ionization and arising of the premature avalanche breakdown. Electric field such of breakdown is about 20% less than one an usual breakdown at a monotonous evolution of the impact ionization. It should be mentioned that this phenomena take place abruptly for no apparent reasons, in particular, without increase of the dark current what is typically for the prebreakdown state of a  $p-n$  junction. Arising conditions of unusual breakdown and its properties allowed to suppose a presence of unlinear processes which responsible for a streamer. Visually the anomalous breakdown is seen as a narrow glowing track of width  $\sim 10 \mu\text{m}$ . This effect takes place in Wannier–Stark ladder regime. Possibly, the latter stimulates a charge accumulation and streamer structure generation.