

# Эффект усиления фототока в МОП-структурах Au/SiO<sub>2</sub>/n-6H-SiC с туннельно-тонким диэлектриком

© И.В. Грехов, М.И. Векслер, П.А. Иванов, Т.П. Самсонова, А.Ф. Шулекин

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

(Получена 13 февраля 1998 г. Принята к печати 17 февраля 1998 г.)

В МОП структурах Au/SiO<sub>2</sub>/n-6H-SiC с туннельно-тонким диэлектриком впервые обнаружен эффект усиления тока фотогенерации. Практически этот эффект может быть использован для повышения эффективности существующих фотодиодов на основе 6H-SiC для ультрафиолетовой области излучения и, кроме того, указывает на возможность создания биполярных SiC-транзисторов с туннельным МОП эмиттером.

## Введение

Карбид кремния, так же, как и кремний, окисляется с образованием на поверхности гомогенной пленки двуоксида кремния (SiO<sub>2</sub>). Термический окисел на n-6H-SiC обладает высокой электрической прочностью; плотность состояний на интерфейсе может быть снижена до величин порядка 10<sup>11</sup> см<sup>-2</sup>, и к настоящему времени на основе SiC уже разработаны классические МОП транзисторы разных типов [1].

Помимо классических приборов, интересными могут быть приборы на основе SiC с туннельно-тонким окислом (до настоящего времени исследований в этом направлении не проводилось). Если в SiC-структурах с туннельно-тонким окислом, так же, как и в туннельных структурах на основе кремния, может быть реализован транзисторный эффект, то это дало бы возможность улучшить параметры SiC-фотодиодов для ультрафиолетовой области излучения и создать биполярные транзисторы с туннельным МОП эмиттером.

Транзисторный эффект в кремниевых МДП структурах с туннельно-тонким диэлектриком был открыт в 70-е годы [2] и детально изучен в структурах Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si. Этот эффект объясняется существенным различием в величинах туннельных токов электронов и дырок: в условиях сильной инверсии зон на поверхности полупроводника ток электронов, инжектируемых из металла в полупроводник, может превосходить ток дырок, поступающих на поверхность для компенсации их утечки из инверсионного слоя в металл, что фактически и означает усиление дырочного тока, поступающего в инверсионный слой [3,4]. Несмотря на достаточно развитую теорию туннельной МДП структуры [5,6], трудно даже грубо предсказать величину коэффициента усиления тока в случае SiC-структур по той причине, что нет информации о величинах энергетических барьеров на границе туннельно-тонкого SiO<sub>2</sub> с SiC.

В этой статье мы представляем результаты исследования SiC-структур с туннельно-тонким окислом, впервые изготовленных и изученных с целью обнаружения возможного транзисторного эффекта.

## Объекты и процедура исследований

Для оценки усиления мы сравнивали величину фототока в МОП структурах Au/SiO<sub>2</sub>/n-6H-SiC и МП структурах Au/n-6H-SiC, изготовленных на одной и той же подложке и конструктивно отличающихся друг от друга только наличием или отсутствием тонкого промежуточного слоя SiO<sub>2</sub> (рис. 1). Использовались гомоэпитаксиальные пленки n-6H-SiC, выращенные методами сублимации и химического осаждения из газовой фазы на грани (0001)Si подложек Лели n-типа проводимости. Концентрация нескомпенсированных доноров в пленках составляла 10<sup>17</sup> см<sup>-3</sup> и 3 · 10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup> соответственно, а их толщина — в пределах 3 ÷ 10 мкм.

Процедура исследований заключалась в следующем. Вначале на каждой из пластин формировались диоды Шоттки путем термического напыления золота через маску и измерялись их вольт-амперные характеристики при освещении ртутной лампой. Для варьирования интенсивности освещения применялись специальные сетчатые фильтры, каждый из которых позволял снижать интенсивность засветки в 6 раз без изменения спектрального состава. Далее золотые контакты стравливались и, с целью подготовки поверхности SiC к "тонкому" окислению, проводилось длительное высокотемпературное окисление с последующим удалением толстого окисла. Тонкий окисел формировался сухим окислением при варьироваемых температуре и длительности процесса (850 ÷ 900 °C и 15 ÷ 60 мин соответственно) с целью подбора необходимых режимов окисления и исследования

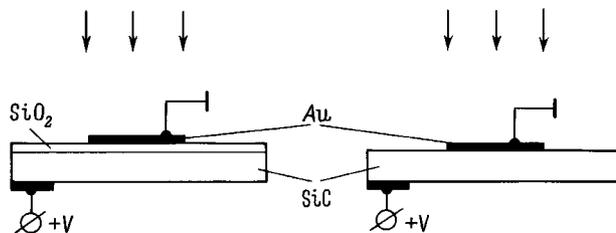


Рис. 1. Схема измерений фототока в структурах Au/SiO<sub>2</sub>/n-6H-SiC (слева) и Au/n-6H-SiC (справа). Стрелками показано направление потока ультрафиолетового излучения.

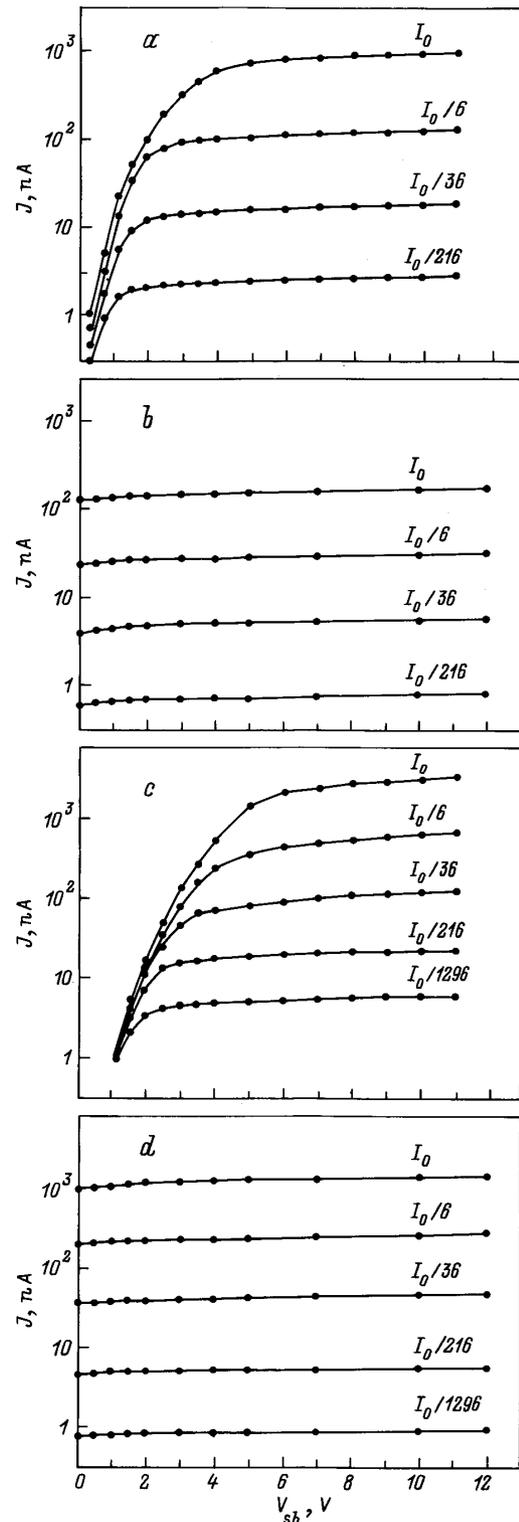
влияния толщины диэлектрика на характеристики МОП фотодетекторов. В остальном работа с МОП структурами (имеется в виду напыление золотых контактов и процедура измерений фотоответа) была идентичной работе с МП структурами. На последней стадии исследований для проверки воспроизводимости полученных результатов на тех же пластинах вновь формировались диоды Шоттки и измерялись их характеристики.

## Результаты исследований и их обсуждение

Фототранзисторный эффект в туннельной МДП структуре заключается в следующем. При подаче на МДП структуру напряжения смещения, соответствующего режиму инверсии, это напряжение делится между обедненной областью полупроводника и слоем диэлектрика. Падение напряжения на слое диэлектрика, определяющее величину полезного туннельного тока электронов, задается (при умеренном легировании полупроводника) поверхностной плотностью неосновных носителей в инверсионном слое (дырок — в случае полупроводника  $n$ -типа). В свою очередь стационарная поверхностная плотность дырок устанавливается такой, чтобы имел место баланс между каналами их генерации (в случае SiC это практически только фотогенерация в обедненном слое полупроводника) и каналами их потерь (туннельная утечка через диэлектрик, диффузия в объем полупроводника из инверсионного слоя при малом напряжении на структуре и рекомбинация с электронами, туннелирующими через диэлектрик). Изменяя интенсивность освещения МДП структуры, мы изменяем ток фотогенерации  $J_{ph}$ . Это приводит к изменению стационарной концентрации дырок в инверсионном слое, изменению падения напряжения на диэлектрике и, соответственно, к изменению туннельного тока электронов  $J_e$ .

Таким образом, если при некотором напряжении, падающем на диэлектрике, туннельный ток электронов существенно больше, чем дырок, то малые изменения тока  $J_{ph}$  могут в принципе приводить к большим изменениям тока  $J_e$ , что и означает усиление. При этом в транзисторной терминологии затвор МДП структуры выполняет роль эмиттера электронов, инверсионный слой — роль индуцированной светом  $p$ -базы, а обедненная область полупроводника — роль коллектора электронов, "инжектированных" из эмиттера. Поскольку из-за весьма малого времени пролета через тонкую индуцированную базу рекомбинацией в ней можно пренебречь, при достаточно эффективном эмиттере усиление в таком транзисторе может быть весьма большим.

Типичные вольт-амперные характеристики исследованных нами МОП структур при освещении ультрафиолетовым светом разной интенсивности показаны на рис. 2,  $a, c$ . Как видно, они имеют более сложный характер зависимости тока от напряжения по сравнению



**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики МОП структур Au/SiO<sub>2</sub>/n-6H-SiC ( $a, c$ ) и МП структур Au/n-6H-SiC ( $b, d$ ) при разных интенсивностях освещения (соседние кривые соответствуют изменению интенсивности освещения в 6 раз). Методы эпитаксии и концентрация нескомпенсированных доноров в пленке  $N_D - N_A \text{ см}^{-3}$ :  $a, b$  — сублимационная,  $10^{17}$ ;  $c, d$  — газофазная,  $3 \cdot 10^{15}$ . Условия формирования тонкого слоя окисла: температура окисления  $950^\circ\text{C}$ ; время окисления  $t$ , мин:  $a$  — 15,  $c$  — 60.

с характеристиками МП структур (рис. 2, *b, d*). Особенности характеристик МОП структур:

во-первых — очень малый фототок короткого замыкания,

во-вторых — резкий (почти экспоненциальный) рост тока при превышении некоторого порогового напряжения,

в-третьих — насыщение тока, причем величина тока при насыщении была пропорциональна интенсивности засветки.

Отметим, что вольт-амперные характеристики МП структур имеют сублинейный характер во всем диапазоне напряжений, а при нулевом смещении есть достаточно большой фототок короткого замыкания. При этом важно то, что насыщенный ток в МОП структурах в  $3 \div 7$  раз превышает соответствующие величины токов в МП структурах, что можно интерпретировать как усиление тока фотогенерации.

Показанные на рис. 2, *a, c* вольт-амперные характеристики соответствуют описанному выше принципу работы туннельного фототранзистора. Действительно, при напряжениях на структуре, меньших порогового (когда еще нет сильной инверсии), падение напряжения на диэлектрике мало, ток через структуру мал (инжекция электронов из полупроводника в металл отсутствует), а приложенное напряжение падает на области пространственного заряда. При подаче напряжения выше порогового, соответствующего сильной инверсии (ток фотогенерации должен быть достаточно большим), появляется туннельный ток электронов, который резко растет с увеличением напряжения смещения за счет того, что значительная часть приращения напряжения смещения падает на диэлектрике. При этом одновременно уменьшается диффузионный поток дырок от поверхности в объем полупроводника.

Рост тока через структуру происходит до тех пор, пока диффузионный ток дырок не уменьшится до нуля и не установится баланс между увеличивающейся с напряжением утечкой дырок через диэлектрик и темпом их фотогенерации в обедненной области. Далее поверхностная концентрация дырок в инверсионном слое перестает зависеть от напряжения смещения, приращение которого почти целиком падает в полупроводнике; при этом ток через структуру стабилизируется (его величина пропорциональна току фотогенерации).

Дополнительным свидетельством в пользу рассмотренного механизма протекания тока является характер влияния толщины SiO<sub>2</sub> на характеристики приборов. Как видно из сравнения рис. 2, *a* и *c*, с ростом толщины окисла пороговое напряжение увеличивается. Этот эффект объясняется, главным образом, тем, что при более толстом окисле для достижения заданного значения туннельного тока требуется большее падение напряжения на диэлектрике (участок экспоненциального роста тока представляет по сути вольт-амперную характеристику окисла). Таким образом, все особенности характеристик

исследованных нами структур качественно схожи с характеристиками структур Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si [4].

Характеристики структур, изготовленных на одной и той же подложке, хорошо воспроизводились и оставались достаточно стабильными при многократных измерениях. Абсолютные величины токов оказались выше в МОП и МП структурах, изготовленных на основе эпитаксиальных пленок с меньшей концентрацией некомпенсированных доноров. Это объясняется большей толщиной обедненной области, в которой происходит фотогенерация носителей и, соответственно, большим током дырок, текущим на поверхность.

## Заключение

В работе экспериментально изучены характеристики МОП структур на основе термически окисленного 6H-SiC с туннельно-тонким диэлектриком. Показано, что в таких структурах дырочная компонента туннельного тока по меньшей мере в  $3 \div 7$  раз меньше электронной компоненты. На практике это может дать существенное повышение эффективности существующих 6H-SiC фотодиодов (в ультрафиолетовой области спектра) за счет фототранзисторного эффекта.

Полученные в данной работе значения коэффициента инжекции МОП эмиттера на SiC вряд ли являются предельными и, по-видимому, могут быть существенно превзойдены при оптимизации системы. В связи с этим представляет интерес создание и исследование трехэлектродных приборов на основе баллистических SiC-транзисторов с индуцированной базой и туннельным МОП эмиттером [4]. Такие транзисторы могут быть конкурентноспособными по отношению к классическим биполярным SiC-транзисторам. Коэффициент усиления по току для последних не превышает  $10 \div 15$  [1] из-за малой диффузионной длины неосновных носителей в базовой области и большой скорости их рекомбинации в области объемного заряда инжектирующего  $p-n$ -перехода. В противоположность этому, в транзисторах с туннельным МОП эмиттером рекомбинация в базе практически отсутствует, так как толщина индуцированной базы весьма мала (менее 5 нм) и электроны проходят ее баллистически за время порядка  $10^{-14}$  с [7]. Коэффициент усиления фототока такого транзистора может быть, по-видимому, достаточно большим, так как он определяется только коэффициентом инжекции эмиттера, а при больших напряжениях на эмиттере (более  $E_g/q$ ) увеличивается еще больше за счет ударной ионизации в коллекторе [7].

## Список литературы

- [1] П.А. Иванов, В.Е. Челноков. ФТП, **29**, 1921 (1995).
- [2] M.A. Green, F.D. King. Sol. St. Electron., **7**, 551 (1974).
- [3] J.G. Simmons, G.W. Taylor. Sol. St. Electron., **29**, 287 (1986).

- [4] I.V. Grekhov, A.F. Shulekin, M.I. Vexler. Sol. St. Electron., **38**, 1533 (1995).
- [5] K.M. Chu, D.L. Pulfrey. IEEE Trans., **ED-35**, 188 (1988).
- [6] М.И. Векслер. ФТП, **30**, 1718 (1996).
- [7] И.В. Грехов, Е.В. Остроумова, А.А. Рогачев, А.Ф. Шулекин. Письма ЖТФ, **17**, № 13, 44 (1991).

*Редактор Т.А. Полянская*

### **The effect of gain of photocurrent in Au/SiO<sub>2</sub>/n-6H-SiC MOS structures with a tunnel thin dielectric**

I.V. Grekhov, M.I. Veksler, P.A. Ivanov,  
T.P. Samsonova, A.F. Shulekin

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

**Abstract** In Au/SiO<sub>2</sub>/n-6H-SiC MOS structures with a tunnel thin dielectric, an effect of gain of current to be excited by photo-generation has been found for the first time. This effect can be utilized in practice for producing 6H-SiC based UV photo-detectors with improved efficiency. Besides, this effect evidences that bipolar transistors with tunnel MOS emitter can be created in SiC.