

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ФОТОТОКА СУБМИКРОННОГО КНИ-МОП-ТРАНЗИСТОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Борздов, В.М. Борздов

Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, borzdov@bsu.by

Путем самосогласованного моделирования на основе многочастичного метода Монте-Карло рассчитан отклик фототока в субмикронном КНИ-МОП-транзисторе с длиной канала 100 нм при воздействии лазерного излучения пикосекундной длительности с длиной волны 532 нм и интенсивностью $2.5 \cdot 10^3$ Вт/см². Показано, что время затухания фототока составляет приблизительно 3 пс после снятия воздействия излучения для всех рассмотренных значений напряжения на стоке транзистора в диапазоне от 0.05 до 1 В.

Введение

Кремниевые полупроводниковые структуры и МОП-транзисторы являются перспективными оптоэлектронными приборами с точки зрения их использования в качестве детекторов излучения видимого и инфракрасного диапазонов, фототранзисторов и фотосенсоров [1-4]. При этом повышенный интерес к МОП-транзисторам обусловлен рядом причин, в частности возможностью простой интеграции таких приборов в интегральные схемы и их дальнейшей миниатюризацией, низким энергопотреблением и достаточно высокой чувствительностью при более низком уровне шумов по сравнению с лавинными фотодиодами. Относительно недавно продемонстрировано использование интегральных МОП-транзисторов со структурой “кремний-на-изоляторе” (КНИ-МОП-транзисторов) в качестве детекторов излучения, работающих в режиме счета одиночных фотонов при комнатной температуре [5].

Для исследования рабочих характеристик фотодетекторов и фототранзисторов в течение достаточно длительного времени широко применяется самосогласованное моделирование на основе метода Монте-Карло. Преимуществом использования многочастичного метода Монте-Карло является возможность непосредственного прослеживания траекторий движения носителей заряда в пространстве координат и импульсов при различных условиях, и как следствие расчет соответствующих функций распределения, плотностей заряда и напряженностей электрических полей, а также возможность непосредственного включения и учета различных процессов рассеяния, поглощения и генерации носителей заряда в приборных структурах [6].

Основная часть

При исследовании рабочих характеристик фотодетекторов и фототранзисторов интерес представляет, в частности, время отклика фототока при воздействии импульса излучения определенной мощности и длительности, поскольку это время определяет быстродействие прибора. В настоящей работе проведено моделирование воздействия короткого импульса лазерного излучения на величину тока в канале субмикронного КНИ-МОП-транзистора. В качестве объекта моделирования рассмотрен КНИ-МОП-транзистор,

сходный по структуре использованному в [5] в качестве однофотонного фотодетектора и аналогичный рассмотренному нами ранее в [7, 8]. Сечение транзистора представлено на рисунке 1. Размеры моделируемых областей следующие: длина канала равна 100 нм, его толщина $W_c = 50$ нм, толщина подзатворного окисла — 5 нм, толщина скрытого окисла $W_b = 145$ нм, толщина подложки $W_{sub} = 200$ нм. Уровень легирования канала акцепторной примесью равен 10^{21} м⁻³. Температура моделирования – 300 К.

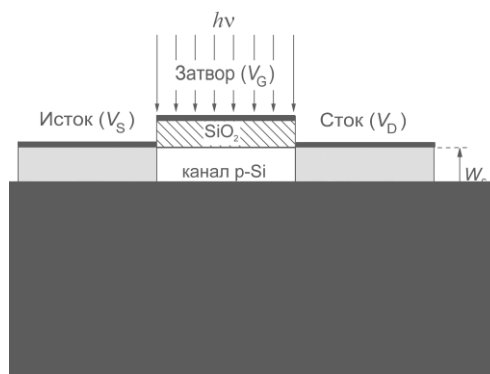


Рис. 1. Структура моделируемого КНИ-МОП-транзистора

Предполагалось, что лазерное излучение с длиной волны 532 нм направлено перпендикулярно плоскости затвора транзистора и охватывает только область канала. Длительность лазерного импульса равна 1 пс.

В качестве приближения мы полагали, что металлизация затвора достаточно тонкая, и ее можно считать прозрачной для используемого излучения. Коэффициент поглощения излучения в Si, а также оценка коэффициентов отражения на границах раздела Si-SiO₂ взяты на основании данных из [9, 10].

Напряжения на затворе V_G и подложке V_{sub} равны нулю. Все напряжения подавались относительно истока ($V_S = 0$). Также напряжение на стоке V_D при проведении расчетов не превышало 1 В, чтобы процессы ударной ионизации в канале транзистора не были существенными и лавинное умножение носителей заряда можно было исключить.

На рисунке 2 приведены зависимости от времени фототока в канале транзистора для не-

скольких значений напряжения на стоке V_D . Предполагалось, что лазерное излучение включается в момент времени $t=0$ и в течение 1 пс действует с постоянной интенсивностью $I = 2.5 \cdot 10^3$ Вт/см² [3]. При этом до начала воздействия излучения моделирование проводилось в течение некоторого времени, достаточного для установления стационарного процесса переноса в канале транзистора.

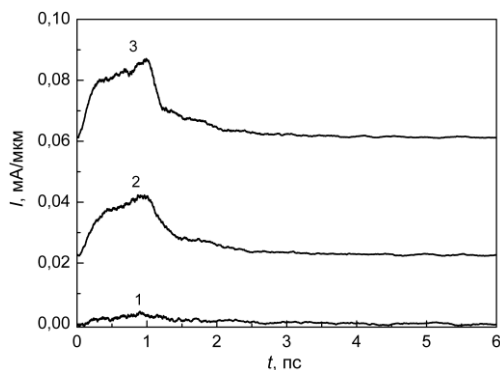


Рис. 2. Отклик фототока на воздействие импульса лазерного излучения при различных напряжениях на стоке транзистора V_D . Кривая 1 – $V_D = 0.05$ В, 2 – $V_D = 0.5$ В, 3 – $V_D = 1$ В

Как видно из рисунка, можно считать, что после окончания воздействия излучения ($t > 1$ пс) стационарное значение тока достигается приблизительно через 3 пс для рассмотренных значений напряжения на стоке. Как показали проведенные расчеты, определенный заряд сгенерированных излучением электронов и дырок сохраняется еще в течение нескольких пикосекунд после практически полного спада фототока до темнового значения. Заряд дырок со временем перемещается в направлении истока транзистора, а заряд электронов — в направлении стока. Сохранение заряда сгенерированных носителей в канале в течение некоторого времени после спада фототока до темнового значения наблюдается также и в фотодиодах со структурой “металл-полупроводник-металл” и объясняется эффектом динамического экранирования в электронно-дырочной плазме [6]. В случае КНИ-МОП-транзистора электронный и дырочный газы в канале транзистора имеют тенденцию к пространственному разделению за счет влияния электродов затвора и подложки. При заданных

напряжениях на электродах затвора и подложки наибольшая плотность заряда дырок наблюдается у границы подзатворный диэлектрик – канал, а заряд электронов вытесняется ближе к границе скрытый диэлектрик – канал. Таким образом, наблюдаемая картина соответствует случаю накопления дырок в потенциальной яме вблизи подзатворного окисла, обусловленному распределением электрического поля в канале транзистора [5].

Заключение

Проведенные расчеты отклика фототока в субмикронном КНИ-МОП-транзисторе с длиной канала 100 нм при воздействии лазерного излучения пикосекундной длительности с длиной волны 532 нм и интенсивностью $2.5 \cdot 10^3$ Вт/см² показали, что время затухания фототока составляет порядка 3 пс после снятия воздействия излучения для всех рассмотренных значений напряжения на стоке транзистора в диапазоне от 0.05 до 1 В. Также установлено, что в течение нескольких пикосекунд после спада фототока до темнового значения в канале транзистора сохраняется определенный заряд сгенерированных излучением электронов и дырок.

Список литературы

1. Jain P., Mishra B.K., Phade G. // International Journal of Computer Applications. 2012. V. 51. № 16. P. 50-54.
2. Gautam R., Saxena M., Gupta R. S., and Gupta M. // Journal of Semiconductor Technology and Science. 2013. V. 13. № 5. P. 500-510.
3. Shiri D., Verma A., and Khader M.M. // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. P. 133708-1-133708-9.
4. Golam Rabbani M., Sundararajan J.P., Verma A. et al. // Semicond. Sci. Technol. 2017. V. 32. P. 1-6.
5. Du W., Inokawa H., Satoh H., and Ono A. // Jap. J. Appl. Phys. 2012. V. 51. P. 06FE01-1-06FE01-4.
6. Mogilestue C. Monte Carlo simulation of semiconductor devices. Springer, 1993. 334 p.
7. Borzdov A.V., Borzdov V.M., V'yurkov V.V. // Proc. SPIE. 2014. V. 9440. P. 944013-1- 944013-7.
8. Borzdov A.V., Borzdov V.M., Dorozhkin N.N. // Devices and Methods of Measurements. 2016. V. 7. № 2. P. 161-168.
9. Aspnes D.E. and Studna A.A. // Phys. Rev. B. 1983. V. 27. № 2. P. 985-1009.
10. Wang H., Liu X., Zhang Z.M. // Int. J. Thermophys. 2013. V. 34. P. 213-225.

MONTE CARLO SIMULATION OF THE PHOTOCURRENT IN SUBMICRON SOI MOSFET UNDER THE EFFECT OF PICOSECOND LASER RADIATION

A.V. Borzdov, V.M. Borzdov

Belarusian State University, 4 Nezavisimosti ave., 220030 Minsk, Belarus, borzdov@bsu.by

By means of self-consistent ensemble Monte Carlo method the simulation of the photocurrent response in the submicron SOI MOSFET with 100 nm channel length has been performed. The photocurrent response has been simulated under the effect of 532 nm wavelength picosecond laser radiation pulse with $2.5 \cdot 10^3$ W/cm² power density. It is ascertained that the photocurrent vanishes after approximately 3 ps after the pulse effect for the considered drain biases in the range from 0.05 to 1 V.