

БАРЬЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НРНТ АЛМАЗА: ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ТОК, ИНДУЦИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ

А. В. Мазаник¹, Н. М. Казючиц², М. С. Русецкий², В. Н. Казючиц²

¹⁾ *Институт энергетики НАН Беларуси, Академическая 15/2, 220072 Минск, Беларусь,
e-mail: mazanikalexander@gmail.com*

²⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: Kazuchits@bsu.by*

Посредством полиэнергетической ионной имплантации бора были созданы барьерные структуры в легированных бором синтетических НРНТ (синтезированных при высоких давлениях и температурах) алмазах. Формирование барьерной структуры связывается со смещением уровня Ферми в разупорядоченном ионами приповерхностном слое к середине запрещенной зоны. Приготовленные барьерные структуры демонстрировали чувствительность к излучению длиной волны 405 нм и к облучению электронами с энергией 10 кэВ, работая без внешнего источника напряжения.

Ключевые слова: НРНТ алмаз; имплантация бора; фоточувствительность; ток, индуцированный электронным лучом.

BARRIER STRUCTURES BASED ON HPHT DIAMOND: PHOTOSENSITIVITY AND ELECTRON BEAM INDUCED CURRENT

A. V. Mazanik¹, N. M. Kazuchits², M. S. Rusetsky², V. N. Kazuchits²

¹⁾ *Institute of Power Engineering, National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya st. 15/2, 220072 Minsk, Republic of Belarus*

²⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: A. V. Mazanik (mazanikalexander@gmail.com)*

Using multi-energy ion implantation, barrier structures based on boron-doped synthetic HPHT (synthesized at High Pressure and High Temperature) diamonds were prepared. The formation of the barrier structure is related to the shift of the Fermi level in the near surface layer damaged by ions to the middle of band gap. The prepared barrier structures exhibit sensitivity both to 405 nm illumination and 10 keV electron beam irradiation operating without the application of an external bias voltage.

Key words: HPHT diamond; boron implantation; photosensitivity; electron beam induced current.

ВВЕДЕНИЕ

Алмаз известен как широкозонный полупроводник ($E_g = 5,5$ эВ), что делает его перспективным для ряда приложений, в частности, для создания детекторов высокоэнергетических частиц и квантов света УФ диапазона. На сегодняшний день достигнутое значение времени жизни неравновесных носителей заряда в кристаллах алмаза составляет единицы микросекунд [1], что сопоставимо с кремнием электронного качества. Для повышения быстродействия приборных структур на основе алмаза мо-

жет быть выполнено облучение высокоэнергетическими частицами, позволяющее контролируемым образом уменьшать время жизни носителей [1]. Широко применяется имплантация в алмаз бора [2], в результате которой могут быть сформированы акцепторные центры вплоть до концентрационного перехода «диэлектрик-металл» [3], что открывает возможности создания омических контактов.

Одним из перспективных применений алмаза является создание высокоэффективных бетавольтаических преобразователей энергии [4–6]. Этому способствуют высокая радиационная стойкость материала, а также большое значение ширины запрещенной зоны, позволяющее добиваться больших выходных напряжений.

В настоящей работе рассматривается взаимодействие с квантами света и электронами с энергией 10 кэВ барьерных структур на основе НРНТ алмаза, сформированных имплантацией ионов бора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В экспериментах использовались легированные бором монокристаллы алмаза типа IIb, синтезированные методом НРНТ. Из объемных кристаллов вырезались плоскопараллельные пластины толщиной 300–600 мкм, после чего их поверхности полировались. В одну из поверхностей пластин выполнялась полиэнергетическая имплантация ионов бора с энергиями 20, 40, 65 и 100 кэВ, что приводило к формированию квазиоднородного дефектного слоя толщиной около 200 нм. Согласно расчетам, выполненным в программе SRIM [7], флюенс ионов бора соответствовал концентрации бора в имплантированном слое порядка 10^{20} см^{-3} .

Поскольку имплантированные образцы не отжигались, имплантированный бор находился преимущественно в междоузлиях и не проявлял электрической активности. В то же время, электрофизические и оптические свойства имплантированной области изменились вследствие разупорядочения кристаллической решетки. Можно ожидать, что наличие радиационных дефектов привело к фиксации (пиннингу) уровня Ферми в имплантированной области вблизи середины запрещенной зоны. Соответствующая упрощенная зонная диаграмма приведена на рис. 1, а.

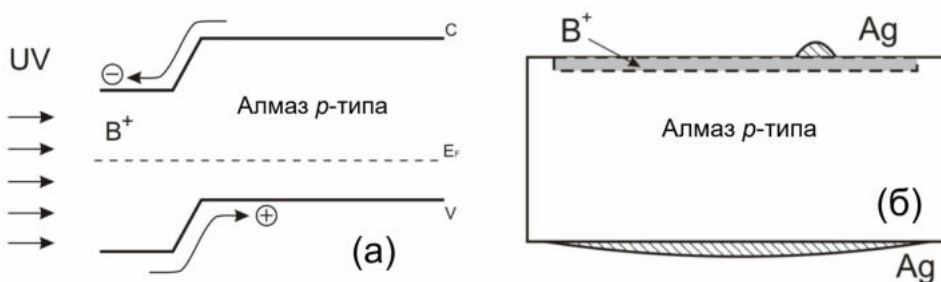


Рис. 1. Упрощенная зонная диаграмма барьерной структуры на основе алмаза *p*-типа (а); схема расположения контактов на пластине (б)

Для выполнения электрофизических измерений на тыльной и имплантированной поверхностях посредством нанесения серебряной пасты с последующим отжигом при 100 °С были сформированы контакты (рис. 1, б).

С целью моделирования работы сформированных барьерных структур в качестве бетавольтаических преобразователей выполнялось их облучение электронами с энергией 10 кэВ с одновременной регистрацией вольт-амперных характеристик. Облучению электронами подвергалась имплантированная бором поверхность.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 приведены вольт-амперные характеристики сформированных барьерных структур при различных значениях тока падающего пучка электронов, а также при освещении лазером 405 нм. На рисунке 3 представлены спектры поглощения пластины алмаза до и после имплантации бора. Исходная (неимплантированная) пластина прозрачна для излучения длиной волны свыше 225 нм, что связано с наличием только фундаментального поглощения в ней. После имплантации ионов бора вследствие формирования радиационных дефектов возникает дополнительное поглощение во всем исследованном спектральном диапазоне, причем наиболее заметные изменения происходят в области длин волн менее 500 нм. Такое поглощение обеспечило чувствительность созданной алмазной структуры к лазерному излучению с длиной волны 405 нм.

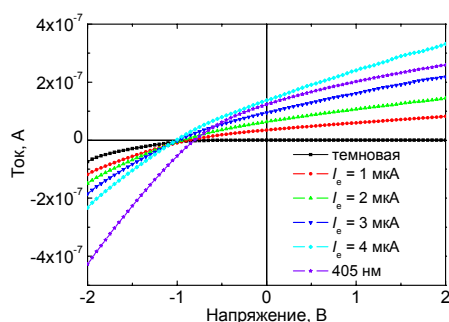


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики барьерной структуры на основе НРНТ алмаза при различных значениях тока падающего электронного пучка I_e , а также при освещении лазером 405 нм

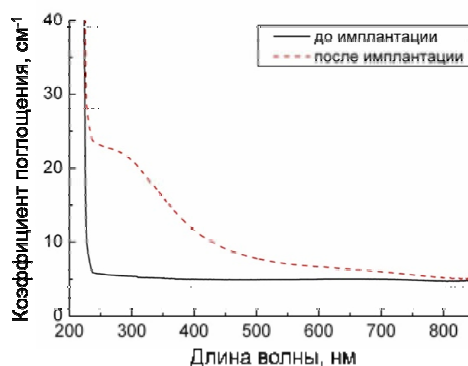


Рис. 3. Спектры поглощения пластины алмаза до и после имплантации бора

Можно видеть, что при увеличении тока падающего электронного пучка происходит монотонное, близкое к линейному, увеличение тока короткого замыкания. Также обращают на себя внимание малые значения коэффициента заполнения вольт-амперных характеристик. Последнее обстоятельство, равно как и малые значения тока короткого замыкания, обусловлены большим последовательным сопротивлением сформированных барьерных структур. Можно ожидать, что наибольший вклад в это сопротивление вносят нарушенный имплантацией слой и несовершенные контакты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показана возможность создания барьерных структур посредством имплантации ионов бора в НРНТ алмаз. Формирование барьерной структуры связывается с фиксацией уровня Ферми в нарушенном ионами слое вблизи середины запрещенной зоны, в то время как в неповрежденной части кристалла он располагается значительно ближе к потолку валентной зоны. При освещении лазером 405 нм либо облучении электронами с энергией 10 кэВ возникает выходное напряжение порядка 1 В. Для увеличения индуцированного квантами света или высокоэнергетическими электронами тока необходимо снижать рекомбинационные потери в материале, а также уменьшать последовательное сопротивление барьерных структур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Carrier recombination and diffusion in high-purity diamond after electron irradiation and annealing / P. Grivickas // Appl. Phys. Lett. – 2020. – Vol. 117. – P. 242103 (1–7).
2. Carrier recombination parameters in diamond after surface boron implantation and annealing / P. Grivickas [et al.] // J. Appl. Phys. – 2020. – Vol. 127. – P. 245707 (1–6).
3. Ionization equilibrium at the transition from valence-band to acceptor-band migration of holes in boron-doped diamond / N. A. Poklonski [et al.] // J. Appl. Phys. – 2016. – Vol. 119. – P. 245701 (1–10).
4. Single crystal CVD diamond membranes for betavoltaic cells / C. Delfaure [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2016. – Vol. 108. – P. 252105.
5. Energy conversion efficiency in betavoltaic cells based on the diamond Schottky diode with a thin drift layer / V. Grushko [et al.] // Applied Radiation and Isotopes. – 2020. – Vol. 157. – P. 109017.
6. Ultrahigh conversion efficiency of betavoltaic cell using diamond pn junction / T. Shimaoka, H. Umezawa, K. Ichikawa, J. Pernot, S. Koizumi // Appl. Phys. Lett. – 2020. – Vol. 117. – P. 103902.
7. <http://www.srim.org/>

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР НА КРЕМНИИ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

С. А. Мискевич, Ф. Ф. Комаров, В. Н. Ювченко

*НИИППП им. А.Н. Севченко БГУ, ул. Курчатова, 7, 220045 Минск, Беларусь
e-mail: sergei.miskevich@inbox.ru*

Разработана физико-математическая модель и представлены результаты моделирования воздействия потока электронов с энергией 2–4 МэВ и дозами до 10^{15} см^{-2} на входные и выходные вольт-амперные характеристики (ВАХ), а также коэффициент усиления p – n – p -биполярного транзистора КТЗ107А.

Ключевые слова: кремний; биполярные транзисторы; радиационное излучение; моделирование; время жизни; рекомбинация; электроны.

OPERATING OF SILICON BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS UNDER THE IRRADIATION

S. A. Miskiewicz, F. F. Komarov, V. N. Yuvchenko

*Institute of Applied Physics Problems of Belarusian State University, Kurchatov str. 7,
220045 Minsk, Belarus*

Corresponding author: S. A. Miskiewicz (sergei.miskevich@inbox.ru)