

сится к «квазипрямой» излучательной рекомбинации электронов в Si и дырок, локализованных в квантовых точках Ge. Энергии активации температурного гашения полосы QD1 составили $E_{a1} \sim 47,1$ мэВ, $E_{a2} \sim 7,4$ мэВ и $E_{a1} \sim 72,7$ мэВ, $E_{a2} \sim 14,9$ мэВ для образцов, созданных без имплантации и с имплантацией ионов Ge^+ в процессе эпитаксиального роста, соответственно.

Работа выполнена по проекту ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»)), задание 2.2.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Brehm M. Site-controlled and advanced epitaxial Ge/Si quantum dots: fabrication, properties, and applications / M. Brehm, M. Grydlik // Nanotechnology. – 2017. – Vol. 28. – P. 392001-1–392001-22.
2. Photoluminescence of compact GeSi quantum dot groups with increased probability of finding an electron in Ge / A. F. Zinovieva [et al.] // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – P. 9308-1–9308-8.
3. Near-infrared photoresponse in Ge/Si quantum dots enhanced by localized surface plasmons supported by aluminium nanodiscs / A. I. Yakimov [et al.] // J. Appl. Phys. – 2020. – Vol. 128, № 14. – P. 143101-1–143101-9.
4. Lasing from glassy quantum dots in crystalline Si / M. Grydlik [et al.] // ACS Photonics. – 2016. – Vol. 3. – P. 298–303.
5. Laser Level Scheme of Self-Interstitials in Epitaxial Ge Dots Encapsulated in Si / M. Grydlik [et al.] // Nano Letters. – 2016. – Vol. 3. – P. 6802–6807.
6. Nucleation and epitaxial growth of Ge nanoislands on Si surface pre-patterned by ion irradiation / J.V. Smagina [et. al.] // Phys. Status Solidi A. – 2013. – Vol. 210, № 8. – P. 1522–1524.
7. Light-emitting tunneling nanostructures based on quantum dots in Si and GaAs / V. G. Talalaev [et. al.] // Semiconductors. – 2012. V. 46, № 11. – P. 1460–1470.
8. Фотолюминесценция наноструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge / Мудрый А. В. [и др.] // Материалы и структуры современной электроники: материалы X Международной научной конференции, Минск, 12–14 октября 2022 г. – Минск: БГУ, 2022. – С. 471–476.

ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР СЕРЕБРА НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ ГЕРМАНИЯ

А. Д. Замковец¹, Л. В. Баран², А. С. Кузьмицкая³,
В. В. Малютина-Бронская³, И. Ю. Фролов³

¹⁾ Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости, 68, 220072 Минск, Беларусь,
e-mail: a.zamkovets@dragon.bas-net.by

²⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: brlv@mail.ru

³⁾ ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», пр. Независимости, 68-1,
220072 Минск, Беларусь, e-mail: malyutina@oelt.basnet.by

С использованием спектроскопии зеркального отражения установлено, что контактирование наночастиц серебра со средним размером 100 нм с подложкой из монокристаллического германия для оптических применений приводит к уменьшению выраженности полосы поверхностного плазмонного резонанса и смещению ее максимума в длинноволновую область спектра относительно ее расположения на стекле. Это связано с поглощением германием излучения видимого диапазона и с высоким

значением показателя преломления данного материала. Показано, что присутствие наночастиц Ag при использовании поперечной схемы измерений значительно увеличивает (от 20 до 90 %) фоточувствительность германиевой подложки в области спектра 400–1100 нм, а при использовании продольной схемы измерений приводит к изменению ее чувствительности с отрицательной на положительную.

Ключевые слова: наночастицы серебра; поверхностный плазмонный резонанс; германий; вольт-амперная характеристика; фотопроводимость.

OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF SILVER NANOSTRUCTURES ON GERMANIUM SUBSTRATES

A. D. Zamkovets¹, L. V. Baran², A. S. Kuz'mitskaya³,
V. V. Malyutina-Bronskaya³, I. Yu. Frolov³

¹⁾ *Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Nezavisimosti Ave., 68, 220072, Minsk, Belarus*

²⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus*

³⁾ *SSPA «Optics, optoelectronics and laser technology»,
Nezavisimosti Ave., 68-1, 220012, Minsk, Belarus*

Corresponding author: A. D. Zamkovets (a.zamkovets@dragon.bas-net.by)

Using mirror reflection spectroscopy, it has been established that the contact of silver nanoparticles with an average size of 100 nm with a monocrystalline germanium substrate for optical applications leads to a decrease in the intensity of the surface plasmon resonance band and a shift of its maximum to the long-wave region of the spectrum relative to its location on glass. This is due to the absorption of visible range radiation by germanium and its high refractive index. It has been shown that the presence of Ag nanoparticles in a transverse measurement scheme significantly increases (from 20 to 90 %) the photosensitivity of the germanium substrate in the spectrum area of 400–1100 nm, and using a longitudinal measurement scheme leads to a change in its sensitivity from negative to positive.

Key words: silver nanoparticles; surface plasmon resonance; germanium; current-voltage characteristic; photoconductivity.

ВВЕДЕНИЕ

Плазмонные наноструктуры обладают уникальными свойствами, связанными с наличием полос поверхностного плазмонного резонанса поглощения (ППРП) в видимой и ближней ИК областях спектра, обусловленных коллективными колебаниями свободных электронов в наночастицах [1–3]. Для серебра, по сравнению с другими благородными металлами, достигается наиболее высокая добротность полосы ППРП [1]. Спектральные характеристики полосы ППРП чрезвычайно чувствительны к форме и размеру металлических наночастиц, а также к свойствам окружающей среды [4]. Расположение плазмонных наноструктур в матрицах и на подложках из различных диэлектрических и полупроводниковых материалов расширяет возможности управления рабочими характеристиками создаваемых оптоэлектронных устройств. Это может быть полезным при разработке новых многофункциональных элементов, использующих несколько рабочих каналов на разных длинах волн инфракрасного и видимого спектральных диапазонов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные образцы изготавливались электронно-лучевым испарением материалов при давлении остаточных газов в рабочей камере $(1-2) \cdot 10^{-3}$ Па. Контроль толщины пленки осуществлялся фотометрически по ослаблению пропускания в области полосы ППРП. Спектральные характеристики зеркального отражения записывались на спектрофотометре МС 122 (Беларусь) при угле падения излучения 10° . Морфология поверхности пленок исследовалась с помощью сканирующего зондового микроскопа NEXT II (ООО «НТ-МДТ», Россия). Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) наноструктур и их зависимостей от длины волны облучения проводилось с помощью автоматизированного базового лазерного испытательного комплекса [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Германий является представителем узкозонных полупроводников. Он известен своими применениями в устройствах для микроэлектроники [6], фотоники и оптоэлектроники [7–9], фотовольтаики [10] и т.д. Данный материал характеризуется высокой подвижностью носителей заряда [6], что позволяет создавать электронные устройства, работающие на более высоких частотах по сравнению с кремнием. Нами использовались подложки из монокристаллического германия для оптических применений [7]. Поскольку данные подложки поглощают излучение видимого диапазона, то осаждение серебра проводилось одновременно и на подложки из стекла, обладающие высокой прозрачностью в видимой области. На рис. 1, а (кривая 1) приведена спектральная характеристика отражения отожженной при 90°C нанометровой пленки серебра, расположенной на стеклянной подложке. Видно, что в области длин волн $\lambda = 400-500$ нм проявляется полоса ППРП с максимумом на $\lambda \sim 450$ нм.

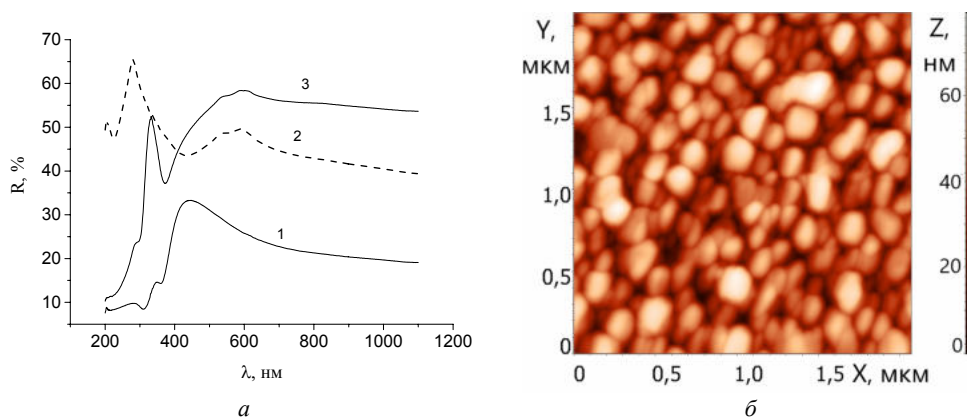


Рис. 1. а – Спектры отражения наноструктуры Ag на стеклянной подложке (1), подложки из Ge (2) и структуры Ag/Ge (3); б – АСМ-изображение поверхности наноструктуры Ag

Анализ АСМ-изображений микрорельефа поверхности данной пленки показал, что она состоит из наночастиц со средним размером около 100 нм, находящихся в условиях плотной упаковки (рис. 1, б). Кривые 2 и 3 на рис. 1, а являются соответственно спектрами отражения германиевой подложки (Ge) и отожженной при 90°C

пленки серебра на этой подложке (Ag/Ge). Как видно из рис. 1, *а*, контактирование наночастиц серебра с германием приводит к значительной модификации полосы ППРП. Она стала слабо выраженной, а ее максимум сместился в длинноволновую область спектра более, чем на 100 нм относительно расположения на стеклянной подложке. Такие изменения связаны с наличием поглощения у германия в области полосы ППРП, а также с высоким значением показателя преломления данного материала.

Измерение продольных и поперечных вольт-амперных характеристик (ВАХ) образцов проводилось при комнатной температуре. Автоматизированный лазерный комплекс включал наличие набора полупроводниковых лазеров с длинами волн 405, 450, 520, 660, 780, 808, 905, 980 и 1064 нм с общим оптоволоконным выводом и калиброванной мощностью излучения порядка 1–2 мВт. Схемы измерений ВАХ приведены на рис. 2. Лазерный луч направлялся в область между зондами при продольной схеме измерений ВАХ и в область около верхнего зонда при использовании поперечной схемы измерений. Результаты измерений представлены на рис. 3.

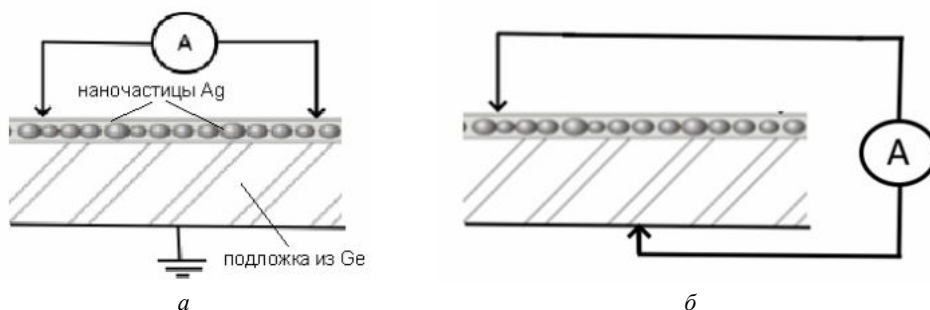


Рис. 2. Схемы измерений ВАХ: *а* – продольная; *б* – поперечная

Установлено, что при использовании поперечной схемы измерений (рис. 3, *а* и *б*) для системы Ag/Ge наблюдается ВАХ диодного типа с отношением темновых токов при положительном и отрицательном напряжении (5 В) порядка 3700. Для подложки Ge такое отношение составляет порядка 220. Таким образом, после нанесения наноструктуры Ag ток при положительном напряжении (5 В) возрос в 1.7 раза, а при отрицательном напряжении (–5 В) уменьшился в 10 раз. При воздействии лазерного излучения в условиях подачи положительных напряжений наблюдается фотоэффект, вклад в который могут вносить как наночастицы серебра, так и граница раздела германия и его собственного окисла, присутствующего на поверхности.

Измерение продольных ВАХ структур Ge и Ag/Ge (рис. 3, *в* и *г*) показало, что ток в приповерхностных слоях Ge в 5 раз выше, чем в структуре Ag/Ge. Такой результат может быть связан с наличием значительного числа поверхностных и объемных ловушек в наночастицах Ag, что обусловлено имеющимися дефектами в виде дислокаций, границ зерен, оксидных оболочек и включений. Можно отметить, что для структуры Ag/Ge наблюдается горизонтальное плато при малых положительных напряжениях смещения 0–1 В. В этой схеме измерений при воздействии лазерного излучения фотоэффект проявляется при обеих полярностях подаваемого напряжения, а

значения фототока при подаче положительных и отрицательных напряжений сопоставимы по величине.

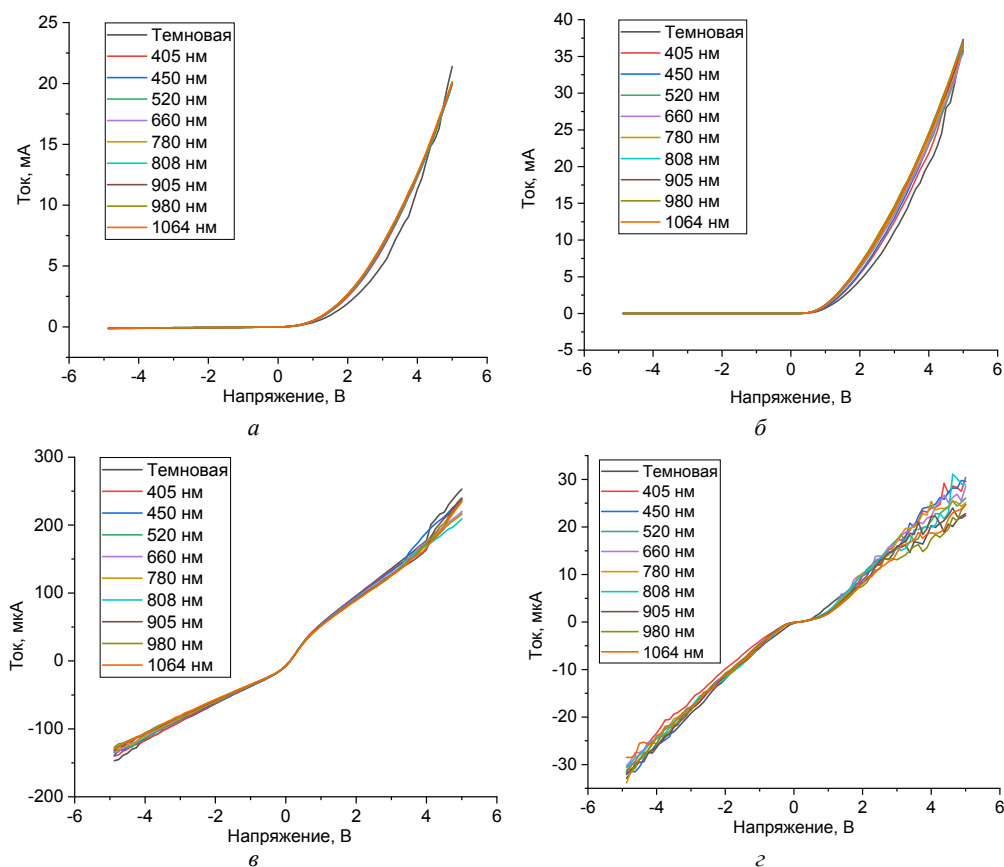


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики Ge (а, в) и Ag/Ge (б, г) в случае поперечного (а, б) и продольного (в, г) измерений

По результатам измерений ВАХ были построены зависимости спектральной чувствительности S ($S = (I_c - I_m) / \Phi$, где I_m и I_c – величины тока в темноте и при облучении соответственно, Φ – мощность источника света). На рис. 4а показаны зависимости $S(\lambda)$ структур Ge и Ag/Ge для случая поперечного измерения ВАХ при напряжении смещения 3В. Из данного рисунка видно, что максимальная чувствительность порядка 2.3 А/Вт достигается на длине волн $\lambda = 405$ нм. Также наблюдаются пики на других длинах волн, но их значения ниже. Из рис. 4, а видно, что после нанесения наноструктуры Ag чувствительность в видимой области спектра увеличилась от 20 до 60% (в зависимости от длины волн), а в ближней ИК области – от 80 до 90%.

На рис. 4, б показаны спектральные чувствительности структур Ge и Ag/Ge при продольном измерении ВАХ, когда напряжение смещения составляет 5 В.

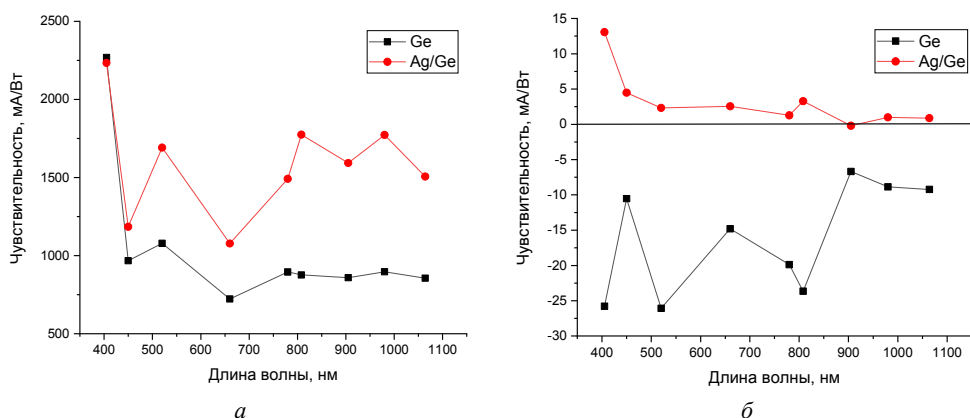


Рис. 4. Спектральные чувствительности структур Ge и Ag/Ge:
а – в случае поперечного измерения ВАХ;
б – продольного измерения ВАХ

Из рисунка видно, что для структуры Ag/Ge максимум чувствительности соответствует длине волны $\lambda = 405$ нм и составляет 13 мА/Вт. С ростом длины волны происходит уменьшение чувствительности S от 5 мА/Вт на $\lambda = 450$ нм до ~1 мА/Вт на $\lambda = 1064$ нм. В случае, когда наночастицы Ag отсутствуют, наблюдается отрицательная фотопроводимость структуры Ge.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что контактирование наночастиц серебра со средними размерами порядка 100 нм с германиевой подложкой приводит к значительной модификации полосы ППРП, связанной с наличием поглощения у германия в видимом диапазоне, а также с высоким значением показателя преломления данного материала. Показано, что присутствие наночастиц Ag при использовании поперечной схемы измерений значительно увеличивает фоточувствительность германиевой подложки (от 20 до 90 % в зависимости от длины волны видимого и ближнего ИК диапазонов), а при использовании продольной схемы измерений приводит к изменению ее чувствительности с отрицательной на положительную.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фунда-ментальных исследований (проект № Ф23В-007).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Kreibig, U. Optical Properties of Metal Clusters/ U. Kreibig, M. Volmer. - Berlin: Springer, 1995. - 533p.
2. Maier, S.A. Plasmonics: Fundamentals and Applications/ S.A. Maier. - New York: Springer, 2007. - 224 p.
3. Климов, В.В. Наноплазмоника/ В.В. Климов. - М.: Физматлит, 2009. - 480 с.
4. Bohren, C. Absorption and Scattering of Light by Small Particles/ C. Bohren, D. Huffman. - N. Y.: Wiley, 1983. - 530 p.
5. Автоматизированный базовый лазерный испытательный комплекс для тестирования перспективных видов полупроводниковых фотоприемников / В. Б. Залесский [и др.] // Приборостроение-2020 : материалы 13-й Междунар. научно-технич. конф., 18–20 ноября 2020 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 391–392.
6. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов/ С. Зи - М.: Мир, 1984. - Ч. 1. - 455 с.

7. Каплунов, И. А. Оптические свойства и области применения германия в фотонике/ И. А. Каплунов, В. Е. Рогалин // Фотоника. – 2019. - Том 13, № 1. – С. 88–106.
8. Рогалин, В.Е. Многодиапазонный фотоприемник на эффекте фотонного увлечения носителей тока в германии для мощных лазеров и к.-диапазона / В. Е. Рогалин, С. А. Филин, И. А. Каплунов // Приборы и техника эксперимента. – 2019. - № 5. С. 92–95.
9. Пчеляков, О.П. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства / О.П. Пчеляков [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34. – № 11. – С. 1281–1299.
10. Миличко, В.А. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития / В.А. Миличко [и др.] // УФН. – 2016. – Т. 186. – С. 801–852.

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СРЕДА НА ОСНОВЕ КОМПЕНСИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

**Н. Ф. Зикриллаев, К. С. Аюпов, М. М. Шоабдурахимова,
А. А. Сатторов, Н. Абдуллаева**

*Ташкентский государственный технический университет
имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан, e-mail: shoabduraximova.m@gmail.com*

В данной работе приведены результаты исследования автоколебательных процессов в компенсированном кремнии, которые дали возможность обоснования физического механизма этого уникального явления и показали возможность создания твердотельных генераторов и датчиков физических величин с частотно-амплитудным выходом. Из анализа литературных данных установлено, что условия возбуждения и параметры автоколебаний тока более подробно исследовались лишь в кремнии, легированном атомами марганца и цинка, а также в полупроводниковых соединениях CdSe, CdS, InGa и в некоторых структурах. В других материалах не очень точно были определены граничные области существования этих неустойчивостей тока в зависимости от внешних факторов. Это привело к отсутствию воспроизводимых результатов и несоответствий корреляции между электрофизическими параметрами материала с параметрами автоколебаний тока (амплитуда, частота). В данной работе приведен физический механизм автоколебаний тока, который имеет согласие с полученными экспериментальными результатами не только в наших исследованиях, но также экспериментальными результатами других авторов.

Ключевые слова: кремний; селен; марганец; автоколебания тока; температура; диффузия.