

УДК 621.31:535.215
EDN: XFEEJU

PACS: 85.60.Gz; 68.65.Hb; 81.10.Aj

Расчет характеристик лавинных фотодиодов Ge/Si с массивом нанотверстий для атмосферного канала связи

Х. Диб, К. И. Швалева, К. А. Лозовой, А. Г. Коротаев, А. В. Войцеховский,
А. П. Коханенко

Рассматриваются параметры лавинных фотодиодов Ge/Si с нанотверстиями для захвата фотонов на длине волны 850 нм. Предложенная конструкция лавинного фотодиода Ge/Si с массивом нанотверстий позволяет значительно увеличить коэффициент усиления, полосу пропускания и коэффициент поглощения. Было продемонстрировано, что можно улучшить эффективность поглощения оптической мощности фотодетектором без ущерба для коэффициента усиления и быстродействия устройства. Результаты работы могут быть использованы для разработки технологии молекулярно-лучевой эпитаксии по созданию лавинных фотодиодов Ge/Si с использованием структур для захвата фотонов с высоким коэффициентом усиления, быстродействием и коэффициентом поглощения. Полученные результаты могут быть применены в ряде направлений исследований, таких как микроскопия визуализации времени жизни флуоресценции, позитронно-эмиссионная томография, системы квантовой связи, а также в лидарных технологиях.

Ключевые слова: лавинный фотодиод, инфракрасные фотодетекторы, коэффициент усиления, полоса пропускания, наноструктуры.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-39-45

Введение

Лавинные фотодетекторы (ЛФД) представляют собой полупроводниковые устройства с внутренним усилением, что делает их основным решением для достижения высоких соотношений сигнал/шум в фотоприемных

модулях. Эти устройства играют важную роль в различных областях применения, таких как волоконная связь [1, 2], спектроскопия [3] и системы визуализации [4]. Компромисс между откликом и полосой пропускания, известный как произведение усиления и полосы пропускания (GBP), является ключевым аспектом при проектировании лавинных фотодетекторов.

Снижение избыточного шума в высокоскоростных лавинных фотодетекторах включает в себя выбор материала с низким коэффициентом ионизации в качестве умножающего слоя [5]. Кремний, известный своим низким коэффициентом ионизации, представляет собой перспективный материал для лавинных фотодетекторов. Однако устройства на основе кремния сталкиваются с трудностями, связанными с коэффициентом поглощения и временными характеристиками из-за компромисса между толщиной области поглощения и быстродействием [6].

Диб Хазем, аспирант.

Швалева Кристина Игоревна, аспирант.

Лозовой Кирилл Александрович, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: lozovoymailbox@mail.ru

Коротаев Александр Григорьевич, декан, к.ф.-м.н.

Войцеховский Александр Васильевич, профессор, д.ф.-м.н.

Коханенко Андрей Павлович, профессор, д.ф.-м.н.

Томский государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Статья поступила в редакцию 30.05.2024

После доработки 13.06.2024

Принята к публикации 24.06.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Диб Х., Швалева К. И., Лозовой К. А., Коротаев А. Г.,
Войцеховский А. В., Коханенко А. П., 2024

Введение германия в качестве поглотителя в структуре с отдельным поглощением и умножением заряда (separate-absorption-charge-multiplication, SACM) позволяет адаптировать кремниевые ЛФД для работы на оптических длинах волн телекоммуникационных систем. В последние годы наблюдается рост интереса к исследованиям Ge/Si ЛФД. Они предлагаются в качестве основного решения для оптических приемников связи благодаря их совместимости с технологией CMOS [7–9]. Текущие исследования направлены на повышение эффективности работы лавинных фотодиодов Ge/Si путем улучшения коэффициента умножения заряда, снижения уровней темного тока и оптимизации времени отклика [10]. Кроме того, микро- и наноструктуры для захвата фотонов в кремнии проявили потенциал для модификации распространения света и улучшения поглощения в фотодетекторах для инфракрасных длин волн. Для увеличения эффективности поглощения света в таких структурах используются эффекты полного внутреннего отражения на границе раздела между полупроводниковым материалом и окружающей средой, многократного рассеяния и дифракции, которые увеличивают длину оптического пути внутри поглощающего слоя. Кроме того, массивы нанотверстий действуют как эффективные антиотражающие покрытия, вызывая конструктивную интерференцию для определенных длин волн, уменьшая отражение на границе раздела воздух/полупроводник и позволяя большей доле оптической мощности проникать в поглощающий слой. Этот подход может помочь решить проблему ограничения произведения полосы пропускания и коэффициента поглощения в полупроводниковых детекторах, за счет улучшения поглощения и увеличения вероятности лавинообразного умножения электронов для получения более высоких значений усиления и более низких уровней шума [11, 12].

Лавинный фотодиод с отдельным поглощением и умножением заряда на основе германия и кремния (Ge/Si ЛФД) представляет собой фотодетектор с усовершенствованной структурой, которая сочетает в себе свойства германия и кремния для достижения эффективного поглощения оптической мощности и лавинного усиления сигнала [13]. В ЛФД

SACM Ge/Si отдельные области поглощения и умножения предназначены для оптимизации поглощения мощности падающего оптического излучения и умножения носителей заряда соответственно. Важным моментом является выбор параметров эпитаксиальных слоев ЛФД Ge/Si, технологически создаваемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии [14]. Особый интерес представляют структуры ЛФД Ge/Si с тонкими слоями. Особенно важны процессы поглощения при работе в ближнем ИК-диапазоне от 850 нм до 1550 нм.

В данной работе были изучены возможности улучшения поглощения оптической мощности с использованием наноструктур для захвата фотонов на длине волны 850 нм. Структуры для захвата фотонов были введены в лавинные фотодиоды Ge/Si внутри слоя поглощения из германия. Было изучено их влияние на поглощение, усиление и полосу пропускания. Ожидается, что поиск оптимальной комбинации этих характеристик будет способствовать разработке сверхбыстрых фотодетекторов с высоким усилением и коэффициентом поглощения, открывая возможность создания высокочувствительных устройств, способных достигать чувствительности на уровне одного фотона, что является необходимым для квантовых и биомедицинских применений [15].

Методы

Рассматриваемая нами структура ЛФД Ge/Si включает сильнолегированный контактный слой Ge *p*-типа, поглощающий слой *p*-Ge, зарядовый слой легированного Si *p*-типа, слой умножения *n*-Si и сильнолегированный контактный слой кремния *n*-типа, как показано на рисунке 1. Распределение примеси в зарядовом слое определяет величину электрического поля в устройстве для заданного приложенного напряжения. С одной стороны, электрическое поле в слое умножения должно быть достаточно большим, чтобы вызвать лавинный пробой. С другой стороны, электрическое поле в слое поглощения должно оставаться как можно более низким, чтобы не вызывать лавинное умножение, которое привело бы к увеличению темновых токов.

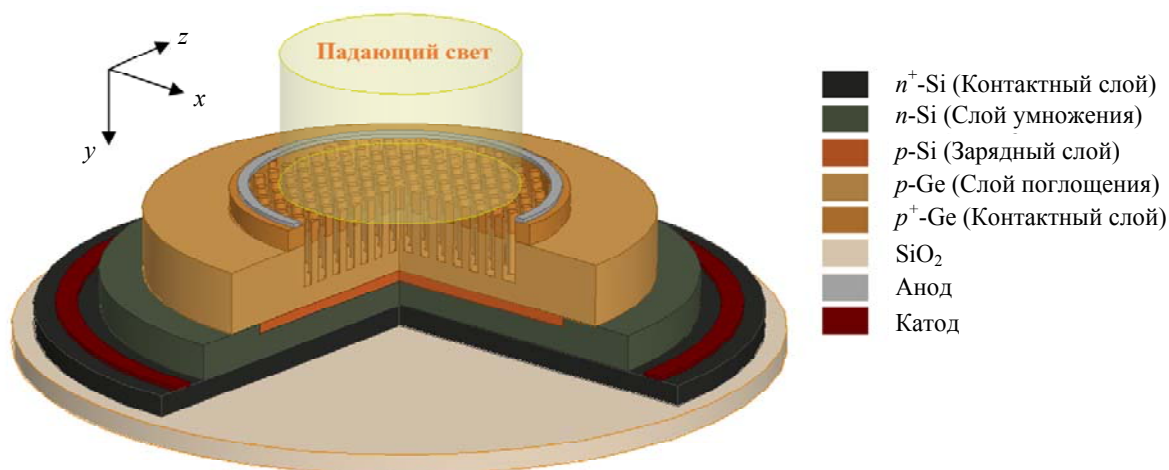


Рис. 1. Поперечное сечение ЛФД Ge/Si

Для анализа взаимодействия между падающей электромагнитной волной и структурой устройства используется метод конечных разностей во временной области (FDTD). С помощью анализа FDTD точно определяется поглощение мощности в различных областях полупроводника. Для моделирования оптических свойств рассматриваемых структур использовалась среда Lumerical FDTD.

Влияние внедрения массива нанотверстий для захвата фотонов и оптимизированного профиля поглощения на параметры лавинного фотодетектора было изучено путем дополнения моделирования оптических свойств моделированием электрических характеристик с использованием программного обеспечения для автоматизированного проектирования Silvaco TCAD.

Результаты

Первоначальная серия расчетов методом FDTD была направлена на выяснение профиля поглощения мощности, когда свет с длиной волны 850 нм вводится в чистый кремний, чистый германий и ЛФД Ge/Si без включения массива нанотверстий. Большая часть света поглощается в приповерхностном слое германия толщиной около 0,4 мкм. Хорошо известно, что кремний может поглощать свет с дли-

ной волны 850 нм. Однако использование германия в качестве поглощающего слоя в фотодиоде может повысить эффективность детектирования. Это улучшение объясняется более высоким коэффициентом поглощения германия на данной длине волны по сравнению с кремнием.

Для лавинного фотодиода на основе кремния с германиевым поглощающим слоем без нанотверстий был проведен анализ профиля поглощения мощности с целью определения оптимальной толщины германиевого поглощающего слоя для эффективного поглощения света (рис. 2). Было показано, что для поглощения 59 % мощности падающего света с длиной волны 850 нм необходим германиевый поглощающий слой толщиной 1 мкм, при этом 38 % мощности отражается от поверхности, а оставшаяся часть проникает в нижележащие слои. Уменьшение толщины слоя Ge до 0,4 мкм существенно снижает поглощение (до 47 %) и увеличивает отражение (до 43 %). Стоит также отметить, что профиль поглощения в этом более тонком слое концентрируется возле верхней поверхности, которая совпадает с высоколегированным p^+ -Ge контактным слоем. Эта область отличается высокой скоростью рекомбинации носителей заряда из-за высокого уровня легирования, что снижает эффективность генерации электрон-дырочных пар.

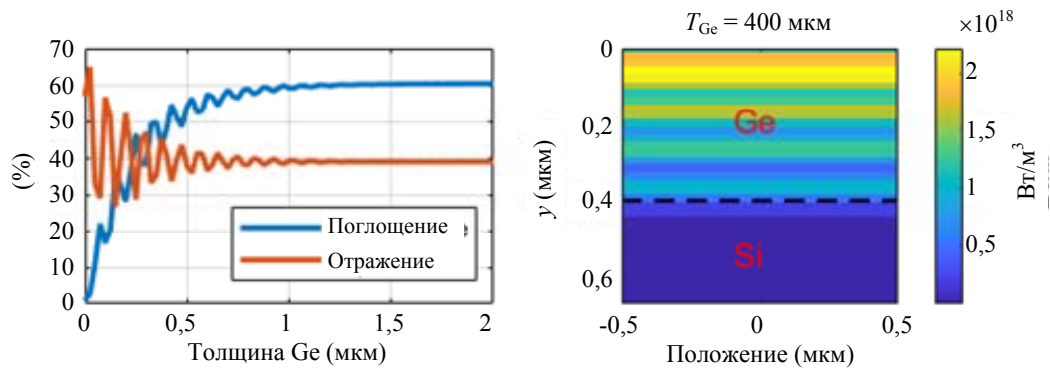


Рис. 2. Лавинный фотодиод без массива нанотверстий: а) – процент поглощенного и отраженного света на длине волны 850 нм в зависимости от толщины поглощающего слоя Ge; б) – профиль поглощения мощности внутри 0,4 мкм Ge слоя

Для исследования эффективности массива нанотверстий для усиления поглощения света была смоделирована область поглощения из германия с уменьшенной толщиной до 0,4 мкм (по сравнению с исходной 1 мкм). Затем внутри германиевого слоя был внедрен цилиндрический массив нанотверстий. Решетка нанотверстий была оптимизирована для максимизации поглощения при 850 нм. Такая оптимизация привела к конфигурации с радиусом отверстия 0,31 мкм и глубиной 0,35 мкм. По сравнению со структурой без

решетки нанотверстий, эта конструкция обеспечивает значительное улучшение нормализованной поглощенной мощности (64 % против 47 %) и уменьшает отражение (30,5 % против 43 %). Примечательно, что решетка нанотверстий позволяет достичь величину коэффициента поглощения, превышающую достижимую сплошным слоем Ge толщиной 1 мкм (59 %). Рисунок 3 иллюстрирует профиль поглощения мощности внутри оптимизированной элементарной ячейки, содержащей решетку нанотверстий.

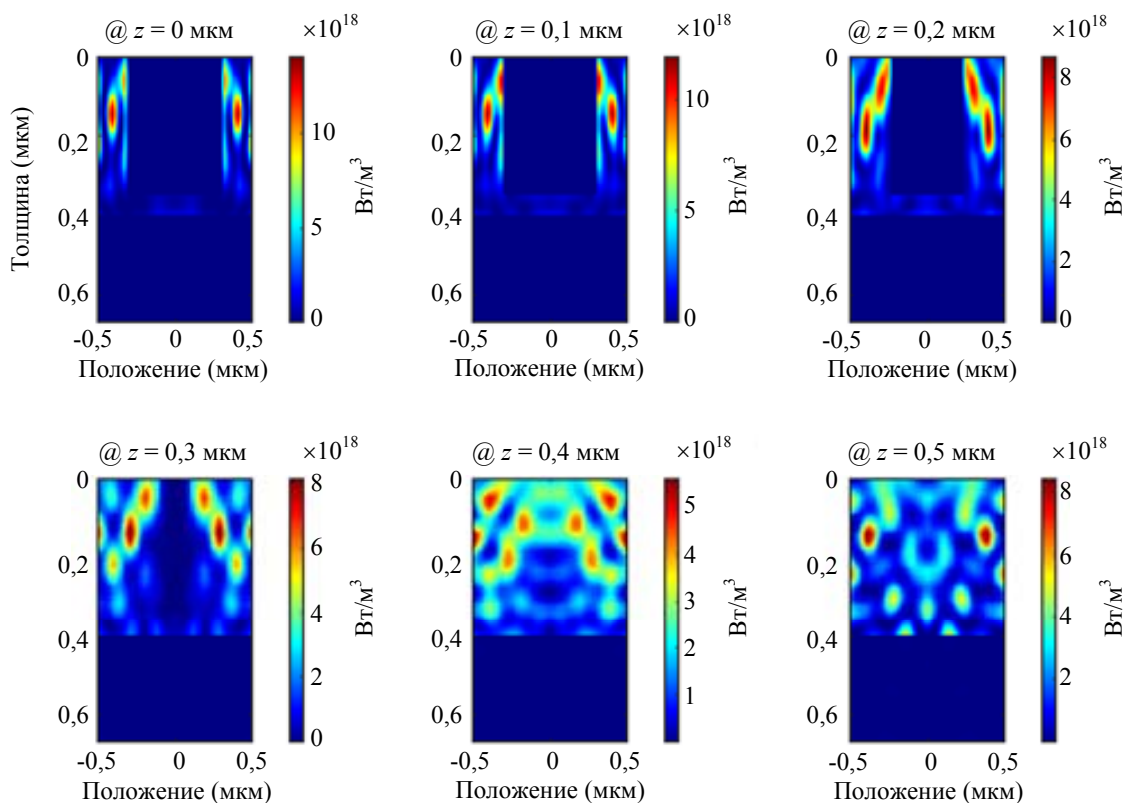


Рис. 3. Профиль поглощения оптической мощности в пределах элемента ячейки массива нанотверстий на длине волны 850 нм

Рисунок 3 демонстрирует решающее преимущество структуры с массивом нанодоверстий по сравнению с неоптимизированным случаем. Решетка нанодоверстий способствует эффективному поглощению мощности по всему слою Ge, что значительно отличается от локализованного поглощения вблизи поверхности, наблюдаемого без решетки (рисунок 2б). Это перераспределение поглощения имеет решающее значение для улучшения характеристик лавинного фотодиода. За счет захвата фотонов и смещения профиля поглощения глубже в слой Ge, решетка нанодоверстий способствует взаимодействию с областями с более низкими уровнями рекомбинации носителей заряда из-за умеренной степени легирования. Это улучшает генерацию пар электрон-дырка и, как ожидается, приведет к общему улучшению характеристик лавинного фотодиода, помимо простого повышения коэффициента поглощения.

Для того чтобы понять влияние внедренной структуры для захвата фотонов и ее воздействия на общие характеристики лавинного фотоприемника, было проведено электрическое моделирование структур с использованием Silvaco TCAD. Рисунок 4 демонстрирует результаты моделирования коэффициента усиления и полосы пропускания. Наблюдаемое здесь поведение кривых отражает аналогичные тенденции в анализе для длины волны 1310 нм, подчеркивая необходимость поиска компромисса между усилением и полосой пропускания. Уменьшение толщины слоя Ge в структуре 2 увеличило ко-

эффициент усиления до 567 по сравнению с величиной $M = 215$ для структуры 1 при напряжении смещения, близком к пробое. Включение оптимизированной решетки нанодоверстий в структуру 3 дополнительно повысило коэффициент усиления до 946, что одновременно сопровождалось улучшением полосы пропускания до 4 ГГц. Однако уменьшение толщины слоя умножения в структуре 4 привело к снижению коэффициента усиления ($M = 113$) при достижении более высокой полосы пропускания (4,7 ГГц) по сравнению со структурой 2 (1,8 ГГц). Наконец, внедрение решетки нанодоверстий в структуре 5 эффективно компенсировало снижение коэффициента усиления, наблюдаемое в структуре 4, повысив его до 180. Более того, полоса пропускания в структуре 5 значительно увеличилась, достигнув значения 8,3 ГГц.

Затем было рассчитано произведение коэффициента усиления на полосу пропускания (GBP) для каждой структуры. Обращает на себя внимание, что структура 3 с внедренной матрицей захвата фотонов демонстрирует значительное увеличение GBP (3828 ГГц) по сравнению со структурой 1 (519 ГГц) и структурой 2 (без решетки, 1046 ГГц). Это преимущество сохраняется в структуре 5 (1491 ГГц), несмотря на меньшую толщину слоя умножения, что подчеркивает эффективность решетки нанодоверстий для достижения как высокого коэффициента усиления, так и широкой полосы пропускания. В структурах без решетки очевидна обратная зависимость между коэффициентом усиления и полосой пропускания.

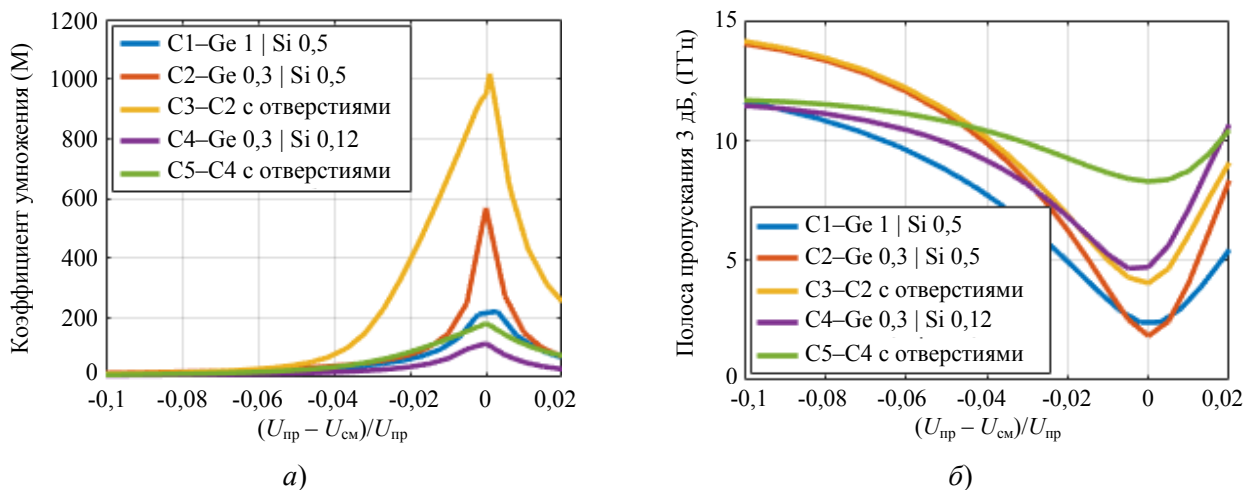


Рис. 4. Характеристики изучаемых лавинных фотодиодов Ge/Si (длина волны 850 нм): а) – коэффициент умножения и б) – полоса пропускания

Заключение

Таким образом, в работе была продемонстрирована возможность оптимизации как коэффициента усиления, так и произведения коэффициента усиления и пропускной способности в фотодетекторах на основе германия и кремния с использованием наноотверстий для захвата фотонов. Эти наноотверстия эффективно уменьшают поглощение оптической мощности с длиной волны 850 нм на поверхности устройства, предотвращая потерю носителей заряда из-за рекомбинации или их медленного транспорта за счет диффузии. Внедрение наноотверстий для захвата фотонов значительно улучшает коэффициент поглощения (с 43 % до 61,8 %). Кроме того, наблюдается заметное увеличение коэффициента усиления и полосы пропускания. В предложенной структуре ЛФД Ge/Si продемонстрировано достижение величины произведения коэффициента усиления и полосы пропускания в 1494 ГГц, что свидетельствует о существенном прогрессе по сравнению с современными устройствами.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWM-2020-0038.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benedikovic D., Virot L., Aubin G. et al. / IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2022. Vol. 28. № 2. P. 1–8.
2. Srinivasan S. A., Lambrecht J., Guermendi D. et al. / Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. 39. № 5. P. 1409–1415.
3. Hakkell K. D., Petruzzella M., Ou F. et al. / Nature Communications. 2022. Vol. 13. № 1.
4. Liu D., Li T., Tang B. et al. / Micromachines. 2022. Vol. 13. № 1.
5. Campbell J. / IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2022. Vol. 28. № 2.
6. Campbell J. C. Journal of Lightwave Technology. 2016. Vol. 34. № 2. P. 278–285.
7. Huang Z., Li C., Liang D. et al. / Optica. 2016. Vol. 3. № 8. P. 793–798.
8. Wang B., Huang Z., Yuan Y. et al. / Photonics Research. 2020. Vol. 8. № 7. P. 1118–1123.
9. Wang B., Huang Z., Sorin W. V. et al. / Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38. № 12. P. 3156–3163.
10. Lacaíta A., Francese P. A., Zappa F., Cova S. / Applied Optics. 1994. Vol. 33. № 30. P. 6902–6918.
11. Kang Y., Zadka M., Litski S. et al. / Optics Express. 2008. Vol. 16. № 13. P. 9365–9371.
12. Timofeev V. A., Mashanov V. I., Nikiforov A. I. et al. / Materials Today Physics. 2023. Vol. 33. P. 101052.
13. Deeb H., Khomyakova K. I., Kokhanenko A. P. et al. / Inorganics. 2023. Vol. 11. P. 303 (1–15).
14. Коханенко А. П., Войцеховский А. В., Лозовой К. А. и др. / Прикладная физика. 2022. № 5. С. 42–48.
15. Lozovoy K. A., Douhan R. M. H., Deeb H. et al. / Nanomaterials. 2023. Vol. 13. P. 3078 (1–24).

PACS 85.60.Gz; 68.65.Hb; 81.10.Aj

Calculation of characteristics of Ge/Si avalanche photodiodes with an array of nanoholes for an atmospheric communication channel

H. Deeb, K. I. Shvaleva, K. A. Lozovoy, A. G. Korotaev, A. V. Voitsekhovskii and A. P. Kokhanenko

Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: lozovoymailbox@mail.ru

Received 30.05.2024; revised 13.06.2024; accepted 24.06.2024

This work evaluates the parameters of Ge/Si avalanche photodiodes (Ge/Si APDs) with nanoholes for photon trapping at 850 nm. The proposed design of a Ge/Si avalanche photodiode with photon traps allows for significant increases in gain, bandwidth, and absorption efficiency.

cy. It has been demonstrated that it is possible to improve the absorption efficiency of the photodetector without compromising the gain and speed of the device. The results of the work can be used to design Ge/Si avalanche photodiodes using trap structures with high gain, speed and absorption efficiency in advanced technologies, such as fluorescence lifetime imaging microscopy, positron emission tomography, quantum communication systems, and lidar technologies.

Keywords: avalanche photodiode, infrared photodetectors, gain, bandwidth, nanostructures.

REFERENCES

1. Benedikovic D., Virot L., Aubin G. et al., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **28** (2), 1–8 (2022).
2. Srinivasan S. A., Lambrecht J., Guermandi D. et al., Journal of Lightwave Technology **39** (5), 1409–1415 (2021).
3. Hakkel K. D., Petruzzella M., Ou F. et al., Nature Communications **13** (1), (2022).
4. Liu D., Li T., Tang B. et al., Micromachines **13** (1), (2022).
5. Campbell J., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **28** (2), (2022).
6. Campbell J. C., Journal of Lightwave Technology **34** (2), 278–285 (2016).
7. Huang Z., Li C., Liang D. et al., Optica **3** (8), 793–798 (2016).
8. Wang B., Huang Z., Yuan Y. et al., Photonics Research **8** (7), 1118–1123 (2020).
9. Wang B., Huang Z., Sorin W. V. et al., Journal of Lightwave Technology **38** (12), 3156–3163 (2020).
10. Lacaíta A., Francese P. A., Zappa F., Cova S., Applied Optics **33** (30), 6902–6918 (1994).
11. Kang Y., Zadka M., Litski S. et al., Optics Express **16** (13), 9365–9371 (2008).
12. Timofeev V. A., Mashanov V. I., Nikiforov A. I. et al., Materials Today Physics **33**, 101052 (2023).
13. Deeb H., Khomyakova K. I., Kokhanenko A. P. et al., Inorganics **11**, 303 (1–15) (2023).
14. Kokhanenko A. P., Voitsekhovskii A. V., Lozovoy K. A. et al., Applied Physics, № 5, 42–48 (2022) [in Russian].
15. Lozovoy K. A., Douhan R. M. H., Deeb H. et al., Nanomaterials **13**, 3078 (1–24) (2023).