

Спектральная зависимость фотопроводимости варизонных структур типа $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, полученных диффузионной технологией

© Н.Ф. Зикриллаев, С.В. Ковешников, С.Б. Исамов, Б.А. Абдурахманов, Г.А. Кушиев

Ташкентский государственный технический университет,
100095 Ташкент, Узбекистан

E-mail: gkushiyev@inbox.ru

Поступила в Редакцию 22 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 19 января 2022 г.

Принята к публикации 19 января 2022 г.

Путем диффузионного легирования кремния германием была получена варизонная структура типа $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$. Элементный анализ поверхности образцов показал, что концентрация кремния (в атомных процентах) составляла 64.5%, германия — 26.9%, кислорода — 5.9%, других элементов — 2.7%. На спектральной зависимости фотопроводимости заметный рост фототока начинается при $h\nu = 0.75-0.8$ эВ, что примерно соответствует ширине запрещенной зоны материала $\text{Ge}_{0.27}\text{Si}_{0.73}$. Разработка диффузионной технологии получения варизонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ позволит разработать фотоприемники с расширенной областью спектральной чувствительности.

Ключевые слова: варизонная структура, диффузия, фотопроводимость, кремний, германий.

DOI: 10.21883/FTP.2022.05.52352.9788

1. Введение

Формирование кластеров примесных атомов в кристаллической решетке полупроводниковых материалов представляет большой интерес в связи с особыми электрофизическими свойствами таких материалов [1–3].

Формирование нанокластеров различных элементов и соединений в решетке может служить основой технологии создания объемно-наноструктурированного кремния [4,5]. До настоящего времени свойства и функциональные возможности таких материалов еще недостаточно изучены. Поэтому большой практический и научный интерес представляет управление состоянием примесных атомов в кремнии, особенно в материалах типа твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$. Получение таких структур позволяет существенно расширить спектральную область чувствительности фотоэлектрических приборов на основе кремния и открывает новые возможности их применения в оптоэлектронике как фотоприемников. Поэтому цель работы — изучение спектральной зависимости фотопроводимости варизонных структур типа $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, полученных диффузионной технологией.

2. Технология изготовления образцов и методы их исследования

Для получения структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ нами использовалась диффузия германия в кремний из газовой фазы. В качестве исходного материала был выбран монокристаллический кремний n -типа с удельным сопротивлением 100 Ом·см. Размер образцов кремния $V \sim 8 \times 4 \times 1$ мм. Диффузионная технология создания структур типа $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ является достаточно сложной, так как коэффициент диффузии атомов германия в

кремнии невелик ($D \sim 10^{-14}$ см²/с), что требует большого времени диффузии [6,7]. Для уменьшения времени диффузии был выбран метод двухэтапной „низкотемпературной“ технологии [8,9]. Образцы Si вместе с навеской Ge помещались отдельно в кварцевую ампулу (с остаточным давлением воздуха ≤ 1 Па). Ампулы помещали в диффузионную печь при начальной температуре $T = 30^\circ\text{C}$, затем печь нагревали до температуры $T_{\min} = 940^\circ\text{C}$ со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$ и выдерживали ампулы при этой температуре в течение $t = 30$ мин. Далее температура печи поднималась до необходимого значения $T_{\max} = 1200^\circ\text{C}$ со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$, и образцы выдерживали при этой температуре в течение $t = 20$ ч. Давление паров диффузанта регулировалось весом навески или объемом ампулы. Расчетное давление паров германия при температуре $T_{\max} = 1200^\circ\text{C}$ во всех экспериментах было равно $P = 1.1$ атм. Значения температуры T_{\max} и T_{\min} , а также время выдержки при заданной температуре определялись экспериментально.

На рис. 1 показана микрофотография торцевой стороны сколотых образцов Si, легированного Ge (Jeol super probe JXA-8800 R/RL в режиме регистрации германия). Из рисунка четко видна толщина слоя, легированного Ge. Управляя температурами T_{\max} и T_{\min} , скоростью нагрева между этапами диффузии удалось получить твердые растворы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ разной толщины и состава. Разработанная технология позволила получить в приповерхностном слое кремния толщиной до $d = 5-6$ мкм твердый раствор $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с меняющимся по глубине значением x . Анализ экспериментальных результатов (рис. 1) показывает, что на поверхности кремния, создается тонкий слой (~ 0.5 мкм) кремния, в котором содержится $\sim 30\%$ Ge, т.е. $\text{Ge}_{0.27}\text{Si}_{0.73}$, после этого слоя доля германия монотонно уменьшается. На глубине

$x = 5$ мкм материал имеет состав $Ge_{0.05}Si_{0.995}$. Таким образом, установлено, что с помощью диффузионной технологии можно получить структуру Ge_xSi_{1-x} , которая является варизонной.

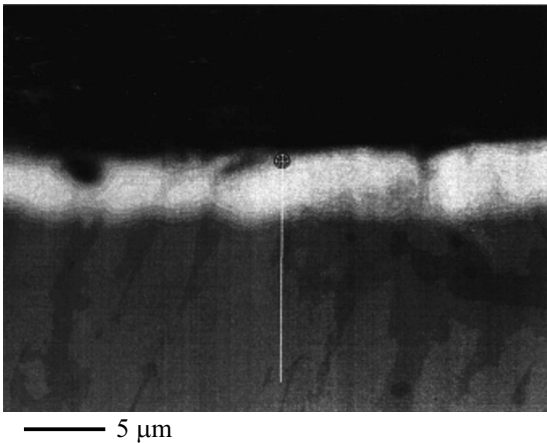


Рис. 1. Микрофотография образцов кремния, диффузионно-легированного германием.

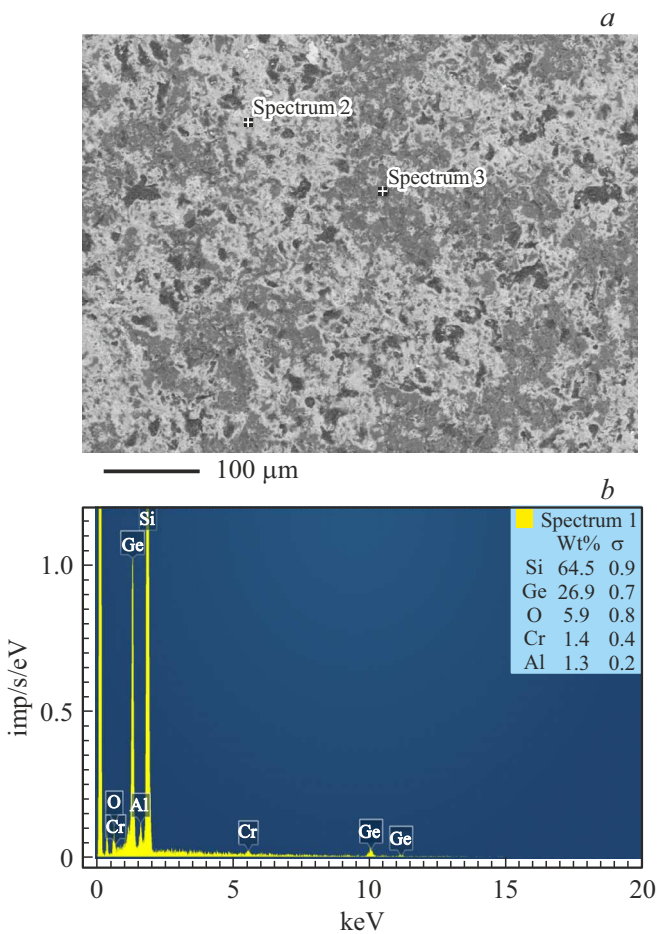


Рис. 2. *a* — топография поверхности образца кремния после легирования германием. *b* — результаты рентгеновского энергодисперсионного микроанализа, полученные на приборе Mira Tescan (спектр 2).

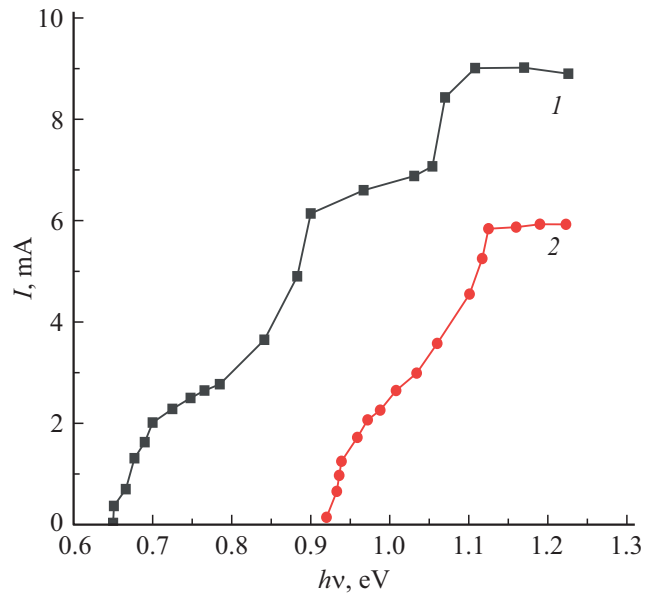


Рис. 3. Спектральная зависимость фотопроводимости образцов при температуре $T = 100$ К, $U = 10$ В (*1* — контроль КЭФ-100, *2* — Ge_xSi_{1-x}).

На рис. 2, *a* представлена топография фронтальной стороны того же образца, полученной сканирующим электронным микроскопом марки Mira Tescan. Как показали результаты исследования в режиме рентгеновского микроанализа (рис. 2, *b*), на поверхности образца концентрация кремния (в атомных процентах) составляла 64.5%, германия — 26.9%, кислорода — 5.9%, другие элементы — 2.7%. Таким образом, в поверхностных слоях кристалла кремния может содержаться до 27% атомов германия.

Для подтверждения того, что полученные структуры имеют тип твердого раствора Ge_xSi_{1-x} , снималась спектральная зависимость фотопроводимости (рис. 3) на установке ИКС-21, снабженной специальным криостатом, позволяющим охлаждать образцы до температуры жидкого азота.

Как видно из рис. 3, в образцах Ge_xSi_{1-x} в отличие от контрольного образца кремния заметный рост фототока начинается при $h\nu = 0.75-0.8$ эВ, а при $h\nu = 1.1$ эВ происходит резкий рост фототока, что связано с началом межзонных переходов в кремнии [10–12]. Увеличение фототока при энергии падающих фотонов больше $h\nu = 0.75-0.8$ эВ в структурах Ge_xSi_{1-x} позволяет утверждать, что в этих образцах имеются области с шириной запрещенной зоны $E_g \sim 0.75-0.8$ эВ.

3. Обсуждение результатов

Управляя параметрами процесса „низкотемпературной диффузии“ удалось получить твердые растворы Ge_xSi_{1-x} толщиной до $d = 5-6$ мкм с концентрацией германия на поверхности до 27%. Такая высокая

концентрация германия не характерна для варизонных структур германий-кремний, полученных другими методами [13,14]. Видимо, это объясняется частичной неравновесностью полученных структур, возникающей в процессе „низкотемпературной диффузии“. Пресыщение по германию может приводить к образованию на поверхности материала кластеров германия. Эти данные подтверждают результаты, полученные авторами [15,16].

Заметный рост фототока полученных образцов, начинающийся при $h\nu = 0.75-0.8$ эВ, может быть объяснен образованием варизонной структуры с составом $Ge_{0.27}Si_{0.73}$ на поверхности образца, для которой в [17,18] экспериментально определена ширина запрещенной зоны $E_g = 0.75$ эВ.

4. Заключение

Показано, что с помощью разработанной диффузионной технологии можно создавать варизонные структуры типа Ge_xSi_{1-x} , управляя величиной x в интервале $x = 0-0.27$. Разработка технологии получения варизонных структур Ge_xSi_{1-x} на основе кремния позволит разработать фотоприемники с расширенной спектральной чувствительностью и более эффективные фотоэлементы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E.R. Johnson, S.M. Christian. Phys. Rev., **95** (2), 560 (1954).
- [2] М.К. Бахадирханов, Б.А. Абдурахмонов, Х.Ф. Зикриллаев. Приборы, **215** (5), 39 (2018).
- [3] В.Г. Кеслер, Л.М. Логвинский, В.И. Машанов, О.П. Пчеляков, В.В. Ульянов. ФТТ, **44** (4), 90 (2002).
- [4] М.К. Бахадирханов, Г.Х. Мавлянов, С.Б. Исамов, Х.М. Илиев, К.С. Аюпов, З.М. Сапарниязова, С.А. Тачилин. Неорг. матер., **47** (3), 545 (2011).
- [5] И.Г.Атабаев, Н.А. Матчанов, Э.Н. Бахранов. ФТТ, **43** (12), 2140 (2001).
- [6] M. Ogino, Y. Oana, M. Watanabe. Phys. Status Solidi A, **72**, 535 (1982).
- [7] Б.И. Иванов, М. Grajcar, И.Л. Новиков, А.Г. Вострецов, Е. Ильичев. Письма ЖТФ, **42** (7), 90 (2016).
- [8] М.В. Шалеев, П.А. Юнин, Д.В. Юрасов, З.Ф. Красильник. ФТП, **49** (8), 1129 (2015).
- [9] Stesmans, T. Nguyen Hoang, V.V. Afanas'ev. J. Appl. Phys., **116** (44), 501 (2014).
- [10] И.Е. Тысченко, Р.А. Хмельницкий, В.В. Сарайкин, В.А. Володин, В.П. Попов. ФТП, **56** (2), 192 (2022).
- [11] Ю.Н. Пархоменко, А.И. Белогорохов, Н.Н. Герасименко А.В. Иржак, М.Г. Лисаченко. ФТП, **38** (5), 593 (2004).
- [12] А.С. Саидов, А. Кутлимуратов, Б. Сапаев, У.Т. Давлатов. Письма ЖТФ, **27** (8), 265 (2001).
- [13] А.Е. Калядин, Н.А. Соболев, А.М. Стрельчук, П.Н. Аруев, В.В. Забродский, Е.И. Шеек. ФТП, **50** (2), 250 (2016).
- [14] Н.А. Байдакова, В.А. Вербус, Е.Е. Морозова, А.В. Новиков, Е.В. Скороходов, М.В. Шалеев, Д.В. Юрасов, А. Номбе, Y. Kurokawa, N. Usami. ФТП, **51** (12), 1599 (2017).
- [15] М.К. Бахадирханов, Н.Ф. Зикриллаев, С.Б. Исамов, Х.С. Турекеев, С.А. Валиев. ФТП, **56** (2), 199 (2022).
- [16] G. Kissingearn, H.G. Grimmeiss. Phys. Status Solidi A, **145**, K5 (1994).
- [17] Ю.В. Помозов, М.Г. Соснин, Л.И. Хируненко, В.И. Яшник, Н.В. Абросимов, В. Шрёдер, М. Хёне. ФТП, **34** (9), 1030 (2000).
- [18] А.А. Ежеский, П.Г. Сенников, Д.В. Гусейнов, А.В. Сухоруков, Е.А. Калинина, Н.В. Абросимов. ФТП, **54** (9), 933 (2020).

Редактор Г.А. Оганесян

Spectral dependence of the photoconductivity of varizon structures of the type Ge_xSi_{1-x} , obtained by diffusion technology

N.F. Zikrillaev, S.V. Koveshnikov, S.B. Isamov, B.A. Abduraxmanov, G.A. Kushiev

Tashkent State Technical University,
100095 Tashkent, Uzbekistan

Abstract By diffusion doping, a graded-gap structure was obtained inner side of the silicon surface, type Ge_xSi_{1-x} . Elementary analysis of the samples showed that the concentration of silicon (in atomic percent) was 64.5%, germanium — 26.9%, oxygen — 5.9%, and others — 2.7%. In the spectral dependence of the photoconductivity, a noticeable increase in the photocurrent begins at $h\nu = 0.75-0.8$ eV, which approximately corresponds to the band gap of the $Ge_{0.27}Si_{0.73}$ material. The development of a diffusion technology for obtaining graded-gap structures Ge_xSi_{1-x} will make it possible to develop photodetectors with an extended spectral sensitivity range.