

Общероссийский математический портал

А. С. Саидов, А. Ю. Лейдерман, А. Б. Каршиев, Термовольтаический эффект  
в варизонном твердом растворе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ),  
*Письма в ЖТФ*, 2016, том 42, выпуск 14, 21–27

<https://www.mathnet.ru/pjtf6354>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и  
согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.80

19 апреля 2025 г., 11:42:31



07

## Термовольтаический эффект в варизонном твердом растворе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ( $0 \leq x \leq 1$ )

© А.С. Саидов, А.Ю. Лейдерман, А.Б. Каршиев

Физико-технический институт НПО „Физика-Солнце“ АН РУз, Ташкент,  
Узбекистан

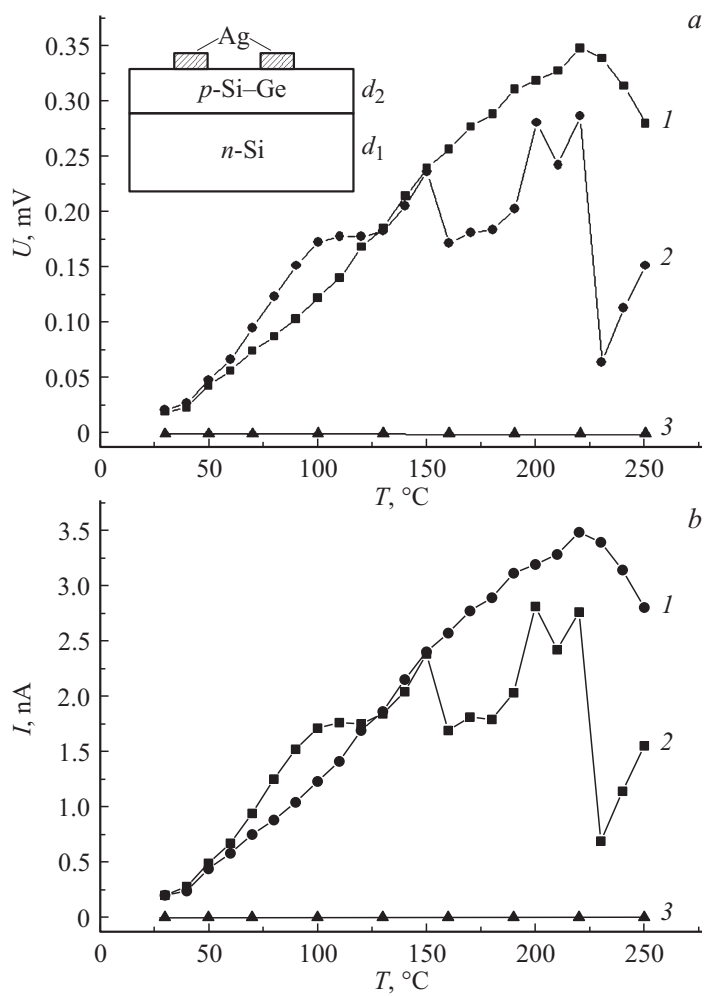
E-mail: amin@uzsci.net

Поступило в Редакцию 1 марта 2016 г.

Впервые наблюдался термовольтаический эффект в варизонном непрерывном твердом растворе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ). Образцы представляли собой гетероструктуры вида  $n\text{-Si}-p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ), полученные методом жидкофазной эпитаксии. В диапазоне  $40\text{--}250^\circ\text{C}$  возникала ЭДС  $0.05\text{--}0.3\text{ mV}$  и ток  $0.0025\text{--}0.0035\text{ }\mu\text{A}$ .

За последнее десятилетие одним из интереснейших новых эффектов был эффект возникновения ЭДС при однородном нагреве материалов на основе моносulfида самария SmS [1–5]. В самое последнее время появилась работа [6], в которой сообщается о наблюдении подобного же эффекта возникновения термоЭДС при однородном нагревании оксида цинка ZnO, неоднородно легированного примесями с переменной валентностью. Сходные эффекты для совершенно других материалов в последние годы наблюдались в ФТИ АН РУз. В работах [7–9] сообщалось о возникновении ЭДС и тока при однородном нагреве образцов с простыми омическими контактами, изготовленных из поликристаллического кремния полученного многократной переплавкой технического кремния на открытом воздухе в солнечной печи. Подобный же эффект, т. е. возникновение ЭДС и тока при однородном нагревании образцов с простыми омическими контактами, изготовленных из полупроводников группы  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ , обладающих  $n$ -типом проводимости и выращенных по методу Чохральского, описан в [10,11].

Как справедливо отмечают авторы [6], это явление представляется весьма интересным для развития таких областей технической физики, как сенсорика и разработка мемристоров.



**Рис. 1.** Температурная зависимость напряжения (а) и тока (b), возникающих в варизонных пленках  $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) с простыми омическими контактами, изготовленных на подложке из  $n\text{-Si}$  с ориентацией  $\langle 111 \rangle$  (кривая 1) и на подложке из  $n\text{-Si}$  с ориентацией  $\langle 100 \rangle$  (кривая 2). Температурная зависимость стандартного монокристаллического кремния (кривая 3). На вставке (а) схема исследуемых образцов.

Цель данной работы — изложение результатов наблюдения термовольтаического эффекта в пленке варизонного твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ).

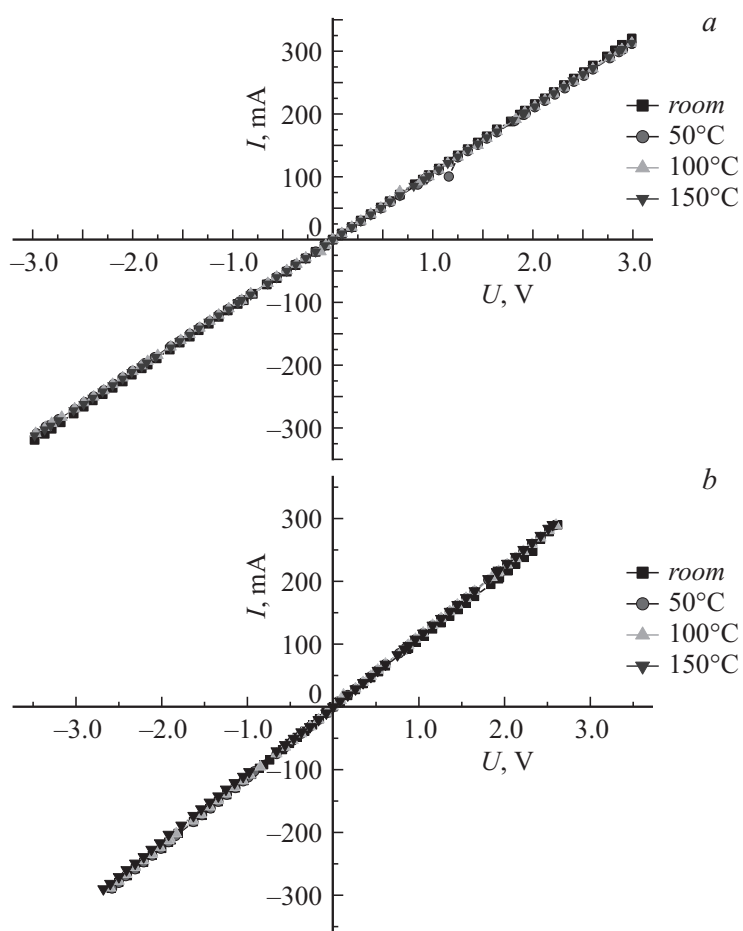
Варизонный твердый раствор  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) выращивался из ограниченного объема раствора-расплава Sn–Si–Ge методом жидкофазной эпитаксии на кремниевых подложках *n*-типа проводимости с ориентацией  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  в температурном диапазоне 1000–750°C. Из полученных материалов были изготовлены образцы с размерами: длина — 8 mm; толщина — 5 mm. Пленки твердого раствора, выращенные на подложках с ориентацией  $\langle 111 \rangle$ , имели монокристаллический характер. Пленки твердого раствора, выращенные на подложках с ориентацией  $\langle 100 \rangle$ , имели поликристаллический характер. После этого к полученным структурам напылением серебра изготавливались омические контакты. На каждую пленку твердого раствора наносилось 2 контакта площадью  $2 \times 1 \text{ mm}^2$ . Схема исследуемых образцов показана на вставке на рис. 1, *a*. Толщина подложки  $d_1 = 400 \mu\text{m}$ , а толщина варизонной пленки  $d_2 = 90 \mu\text{m}$ . Полученные образцы подвергались однородному нагреву в вакууме.

Проведенные исследования показали, что даже при небольшом увеличении температуры в этих образцах генерируются токи и напряжения, которые фиксируются аппаратурой, подключаемой между двумя омическими контактами, расположенными на поверхности варизонных твердых растворов. Результаты измерений показаны на рис. 1, *a* и *b*.

Как видно из рис. 1, *a* и *b*, варизонные пленки  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) генерируют ЭДС и ток, независимо от того, выращены они на подложке Si с ориентацией  $\langle 111 \rangle$  или  $\langle 100 \rangle$ , но эффект сильнее на подложках, выращенных на кремнии с ориентацией  $\langle 111 \rangle$ .

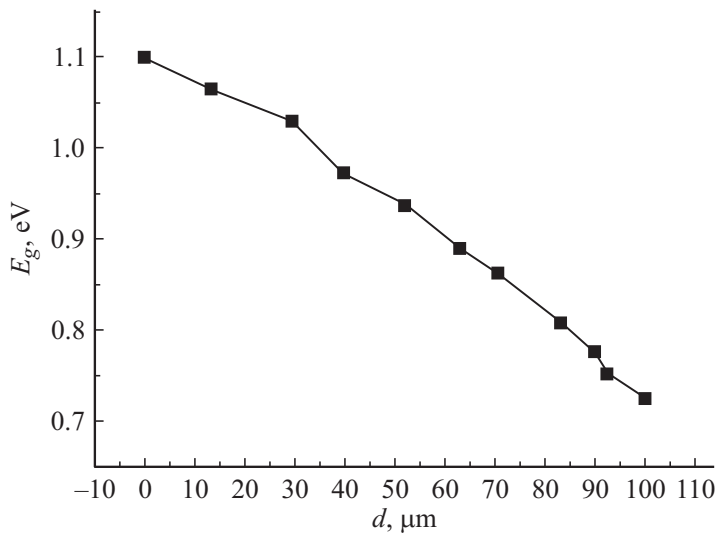
Для того чтобы убедиться, что за данный эффект ответственны только варизонные пленки  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , были проведены измерения их вольт-амперных характеристик в этом же температурном диапазоне. Они показаны на рис. 2, из которого ясно видно, что для обоих типов пленки ВАХ имеет омический характер и практически не меняется в исследуемом диапазоне температур.

Варизонные полупроводники — это полупроводники с переменной шириной запрещенной зоны, т.е. с ее зависимостью от толщины образца  $E_g(x)$ . Структуры на основе таких полупроводников стали предметом изучения еще в 80-е годы прошлого века. В первую очередь,



**Рис. 2.** ВАХ варизонных пленок  $p\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ , изготовленных на кремниевых подложках с ориентацией  $\langle 111 \rangle$  (a) и  $\langle 100 \rangle$  (b).

это работы, выполненные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН под руководством Ж.И. Алфёрова, на основе гетеропереходов GaAs–AlGaAs [12]. Используемый в данной работе метод жидкофазной эпитаксии



**Рис. 3.** Зависимость ширины запрещенной зоны варизонного непрерывного твердого раствора  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ), полученная измерением фотолюминесценции.

позволяет получать материалы с переменной концентрацией второго компонента и соответственно с переменной шириной запрещенной зоны в широком диапазоне. В частности, этот метод позволил нам получить непрерывный твердый раствор  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , в котором содержание германия меняется от  $x = 0$  (т.е. чистый кремний) до  $x = 1$  (т.е. чистый германий). Соответственно ширина запрещенной зоны  $E_g(x)$  также будет иметь сильную зависимость от толщины образца. Результаты измерений  $E_g(x)$  для такого твердого раствора, полученные измерением фотолюминесценцией по сколу образца, представлены на рис. 3.

Из этого рисунка видно, что в исследуемых пленках (толщина которых  $\sim 90 \mu\text{m}$ ) ширина запрещенной зоны меняется очень сильно, начиная с кремния ( $E_g \approx 1.12 \text{ eV}$ ) и заканчивая германием ( $E_g \approx 0.74 \text{ eV}$ ). Очевидно, что при этом исходная равновесная концентрация может меняться на несколько порядков. Компьютерная обработка полученной кривой показывает, что зависимость  $E_g(x)$  не линейная, она хорошо

аппроксимируется закономерностью вида

$$E = E_0 - Ae^{R_0x}, \quad (1)$$

где  $E_0 = 1.479$  eV,  $A = 0.377$  eV,  $R_0 = 0.007$ .

Таким образом, в исследуемой пленке  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ), так же как и в работах [1–5], наблюдается термовольтаический эффект, т.е. при однородном нагревании образца с омическими контактами возникают термоЭДС и ток. Понимание природы этого явления, безусловно, требует дальнейших исследований. Но сходство полученных результатов с результатами [1–5] заставляет предположить, что в технологическом процессе выращивания пленки твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) возникает небольшой градиент примесных акцепторных центров, что делает ее в какой-то степени сходной с образцами сульфида самария  $\text{SmS}$  с областью избыточного самария до состава  $\text{Sm}_{1.04}\text{S}$ . Конечно, эти модельные представления основываются только на аналогии и нуждаются в дальнейшей детальной разработке.

Работа выполнена по гранту фундаментальных исследований Ф2-ФА-0-97004 АН РУз.

## Список литературы

- [1] Казанин М.М., Каминский В.В., Соловьев С.М. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 5. С. 136–138.
- [2] Каминский В.В., Соловьев С.М. // ФТТ. 2001. Т. 43. В. 3. С. 423–426.
- [3] Каминский В.В., Казанин М.М. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 8. С. 92–94.
- [4] Егоров В.М., Каминский В.В., Казанин М.М., Соловьев С.М., Голубков А.В. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 14. С. 57–61.
- [5] Егоров В.М., Каминский В.В., Казанин М.М., Соловьев С.М., Голубков А.В. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 8. С. 50–54.
- [6] Пронин И.А., Аверин И.А., Божинова А.С., Георгиева А.Ц., Димитров Д.Ц., Карманов А.А., Мошников В.А., Папазова К.И., Теруков Е.И., Якушова Н.Д. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 19. С. 23–29.
- [7] Саидов А.С. // Альтернативная энергетика и экология (Int. J. Altern. Energy Ecol.). 2010. В. 3 (83). С. 22–25.
- [8] Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Манишуров Ш.Т. // Альтернативная энергетика и экология (Int. Sci. J. Altern. Energy Ecol.) 2011. В. 5 (97). С. 27–33.

- [9] Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Аюханов Р.А., Манищуров Ш.Т., Абакумов А.А. // Альтернативная энергетика и экология (Int. Sci. J. Altern. Energy Ecol.). 2012. В. 4 (108). С. 42–47.
- [10] Leyderman A., Saidov A., Khashaev M., Rahmonov U. // J. Mater. Sci. Res. 2013. V. 2. N 2. P. 14–21.
- [11] Лейдерман А.Ю., Саидов А.С., Хашаев М.М., Рахмонов У.Х. // Альтернативная энергетика и экология (Int. Sci. J. Altern. Energy Ecol.). 2015. В. 7 (171). С. 55–69.
- [12] Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Корольков В.И., Третьяков Д.И., Тучкевич В.М. // ФТП. 1967. Т. 1. В. 10. С. 1579–1581.