

Министерство промышленности и торговли РФ
Государственная корпорация «Ростех»
АФК «Система»
Фонд «Сколково»
АО «НИИМЭ»
АО «НИИМА «Прогресс»
НИУ «МИЭТ»

Генеральный информационный партнер –
АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»

Международный форум «Микроэлектроника-2019»
5-я Международная научная конференция
«Электронная компонентная база и микроэлектронные модули».
Сборник тезисов

Республика Крым,
г. Алушта, 30 сентября – 05 октября 2019 г.

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2019

УДК 621.3.01/.09

ББК 38.843

М43

Международный форум «Микроэлектроника-2019»

5-я Международная научная конференция

«Электронная компонентная база и микроэлектронные модули».

Сборник тезисов

Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября – 05 октября 2019 г.

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 592 с.

В выпуск включены тезисы докладов конференции, освещающие актуальные вопросы разработки, производства и применения электронной компонентной базы и электронных модулей.

Из года в год «Микроэлектроника» привлекает все большее число участников, их география расширяется новыми российскими регионами и зарубежными странами. За пять лет работы форума в нем приняло участие 2044 делегата. С момента создания мероприятия прозвучало 963 доклада, участниками события стали 859 компаний.

Оргкомитет форума выражает благодарность Николаю Сергеевичу Савищеву и Дарье Александровне Шевелевой за большую помощь в подготовке к изданию сборника тезисов.

© 2019, Компания «ПрофКонференции»

© 2019, АО «НИИМА «Прогресс»

© 2019, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

© 2019, АО «НИИМЭ»

© 2019, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

Рисунки воспроизводятся в том виде, в котором предоставлены авторами.



преобразователь, позволяет добиться дополнительного увеличения поглощения солнечной энергии за счет ее преобразования в тепловую энергию, которая впоследствии используется для генерации электрической энергии термоэлектрическим преобразователем. Представленная концепция играет важную роль в создании гибких солнечных элементов будущего поколения.

Работы выполнены на оборудовании центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» НИУ МИЭТ при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственный контракт № 14.575.21.0149, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57517X0149), с привлечением центра НТИ МИЭТ «Сенсорика»

Литература

1. Green M. A. and Bremner S. P. Energy conversion approaches and materials for high-efficiency photovoltaics // Nature Materials, 16, 2017, pp. 23–34.
2. Nayak P. K., Mahesh S., Snaith H. J. and Cahen D. Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art // Nature Reviews Materials, 4, 2019, pp. 269–285
3. Li W., Guler U., Kinsey N., Naik G. V., Boltasseva A., Guan J., Shalaev V. M., Kildishev A. V. Refractory Plasmonics with Titanium Nitride: Broadband Metamaterial Absorber // Advanced Materials. 26(47), 2014, 7959–7965.
4. Liu Z., Chen Z. and Yu F. Microencapsulated phase change material modified by graphene oxide with different degrees of oxidation for solar energy storage // Solar Energy Materials and Solar Cells, 174, 2018, pp. 453–459
5. Lumerical Solutions, Inc. URL: <https://www.lumerical.com/products/fdtd-solutions>.

УДК 620.92:537.322.11:004.942

Усиление термоэлектрических свойств тонкой нанопленки поликристаллического кремния посредством подстройки размера зерна для энергосберегающих применений

Белова С. Д.¹, Дюжев Н. А.², Новиков Д. В.², Глаголев П. Ю.²

¹ ООО «Микрофотоника»

² ЦКП «МСТ и ЭКБ», Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

glagolev@ckp-miet.ru

Ключевые слова: поликристаллический кремний, теплопроводность, коэффициент Зеебека, тонкие пленки.

В связи со стремительным развитием беспроводных систем связи современные энергосберегающие технологии требуют развития новых классов наноматериалов для термоэлектрических элементов, обеспечивающих высокую эффективность преобразования тепловой энергии в электрический сигнал для обеспечения длительной работы устройств без подзарядки. Поликристаллические кремниевые пленки представляют одним из наиболее перспективных материалов для термоэлектрических преобразователей энергии вследствие своей высокой термоэлектрической эффективности, а также благодаря хорошей совместимости с кремниевой технологией [1]. Дело в том, что основным параметром, характеризующим термоэлектрическую эффективность

наноматериалов, является так называемая добротность $ZT = \sigma S_{eff}^2 T / \kappa_{\Sigma}$, где σ — электропроводность, S_{eff} — коэффициент Зеебека, T — температура, κ_{Σ} — общая теплопроводность. Из работы [2] хорошо известно, что добротность объемного Si, а также толстых поликристаллических Si-пленок (более 500 нм) составляет малую величину порядка 0,01, поскольку теплопроводность Si на данных масштабах остается высокой. Ранее в [3] было показано, что наноструктурирование термоэлектрических материалов на основе кремния приводит к заметному росту добротности и улучшению их термоэлектрической эффективности, что связано со снижением результирующей теплопроводности вследствие уменьшения фононного вклада в теплоперенос в процессе уменьшения размера зерна. В настоящей работе проводятся исследования оптимальных технологических параметров формирования поликристаллической Si-пленки с улучшенными термоэлектрическими свойствами, а также сопоставление полученных результатов с предполагаемыми теоретическими оценками. В конце статьи приводятся выводы и соображения по возможным способам усиления термоэлектрического эффекта в поликристаллической Si-структуре. Далее представлены основные экспериментальные и теоретические результаты работы.

Для расчета коэффициента Зеебека S_{eff} как функции концентрации носителей заряда может быть использована следующая аналитическая формула: $S_{eff} = k_B / e \left[A + \ln \left\{ 2(2\pi m_{h^*} k_B T)^{3/2} / \bar{p} h^3 \right\} \right]$, где k_B — постоянная Больцмана, e — заряд электрона, m_{h^*} — эффективная масса дырки, \bar{p} — средняя концентрация дырок, h — постоянная Планка, $A = r + 2$, r — параметр рассеяния. Как было упомянуто в [2, 4], в этом случае средняя концентрация носителей выражается как $\bar{p} = f(N_a, w, d_g, E_F, Q_T, E_T)$, где N_a — легирующая (акцепторная) концентрация, w — ширина обедненной области, d_g — размер зерна, E_F — уровень энергии Ферми, Q_T и (E_T) — плотность захвата состояния на границе раздела зерен (энергия). В свою очередь, для расчета ZT необходимо знать электрическую теплопроводность поликремния в зависимости от размера зерна. Электропроводность взята из [2] как $\sigma = e^2 \bar{p} d_g (2\pi m_{h^*} k_B T)^{-1/2} \exp(-e^2 N_a w^2 / 2\epsilon_0 k_B T)$, где ϵ_0 — электрическая постоянная, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость поликремния. Коэффициент определяется по следующему выражению [5]: $\kappa_{\Sigma} = \kappa_B / (\beta_{\kappa} + \kappa_B R_{\kappa} / d_g)$, где $\beta_{\kappa} = 1 + \lambda_{ph} / d_g$, λ_{ph} — средняя длина свободного пробега в поликремнии, α — показатель степени (в диапазоне от $1/2$ до $3/4$), κ_B — теплопроводность материала поликремния, R_{κ} — сопротивление Капицы.

Следующие значения параметров были выбраны для вычислений (для поликремния): $A = 1,93$, $Q_T = 1,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $E_T = -0,17 \text{ эВ}$ (относительно собственного уровня энергии) $m_{h^*} = 1,21 m_e$, где m_e — масса электрона, $\epsilon = 11,7$, $\alpha = 0,75$, $R_{\kappa} = 1,95 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$, $N_a = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\kappa_B = 146 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $T = 300 \text{ К}$. Физические величины \bar{p} , E_F и w были рассчитаны как функция вышеуказанных параметров из численного анализа.

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента Зеебека и figure of merit от размера зерна. Как видно из рисунка, значения S_{eff} и ZT при размере зерна в диапазоне до 10 нм увеличиваются с уменьшением d_g , в то время как при дальнейшем росте зерна происходит увеличение ZT , которое достигает величины порядка 0,03 при $d_g = 50 \text{ нм}$, что совпадает с результатами недавних экспериментальных исследований [3].

Таким образом, определены оптимальные технологические параметры для формирования поликристаллической Si-нанопленки толщиной в диапазоне

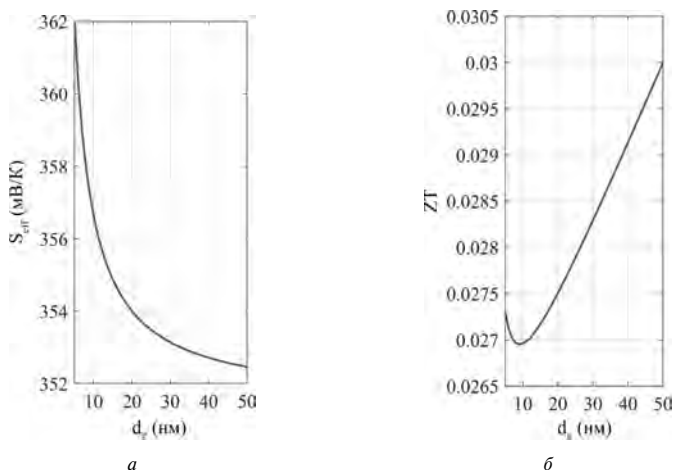


Рис. 1. Вариация (а) коэффициента Зеебека и (б) добротности поликремниевых тонких пленок с размером зерна

до 50 нм с высокой термоэлектрической эффективностью $ZT \approx 0,03$ и коэффициентом Зеебека выше 352,5 мВ/К. Проведен теоретический расчет термоэлектрических свойств поликристаллической Si-пленки, демонстрирующий хорошее соответствие с экспериментом.

Работы выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» НИУ МИЭТ при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственный контракт № 14.581.21.0021, уникальный идентификатор проекта RFMEFI58117X0021), с привлечением Центра НТИ МИЭТ «Сенсорика».

Литература

1. Dunham M. T., Lorenzi B., Andrews S. C., Sood A., Asheghi M., Narducci D. and Goodson K. E. Enhanced phonon scattering by nanovoids in high thermoelectric power factor polysilicon thin films // Applied Physics Letters, 109(25), 2016, 253104.
2. Lu N. C.-C., Gerzberg L., Lu C.-Y., Meindl J. D. Modeling and optimization of monolithic polycrystalline silicon resistors // IEEE Trans. Electron Devices, 28 (7), 1981, pp. 818–830.
3. Valalaki K., Vouroutzis N. and Nassiopoulou A. G. Significant enhancement of the thermoelectric figure of merit of polycrystalline Si films by reducing grain size // Journal of Physics D: Applied Physics. 49, 2016, 315104.
4. Sato Y. A Method of Self-Recovering Equalization for Multilevel Amplitude-Modulation Systems // IEEE Transactions on Communications, Volume: 23, Issue: 6, 1975, pp. 679–682
5. Dong H., Wen B. and Melnik R. Relative importance of grain boundaries and size effects in thermal conductivity of nanocrystalline materials // Scientific Reports, 2014, 4(1).