

# Влияние импульсного токового отжига на электрофизические характеристики поликристаллического кремния *p*-типа

© В.А. Гридчин, В.М. Любимский<sup>¶</sup>

Новосибирский государственный технический университет,  
630092 Новосибирск, Россия

(Получена 7 июня 2004 г. Принята к печати 21 июня 2004 г.)

Исследовано влияние импульсного токового отжига на электропроводность, концентрацию, подвижность дырок и пьезосопротивление в поликристаллическом кремнии. Отжиг проводился последовательностью импульсов тока, что позволило уменьшить величину порогового тока. После импульсного отжига наблюдается рост подвижности при неизменяющейся концентрации дырок, а также уменьшение по абсолютной величине коэффициентов продольной и поперечной тензочувствительности. Уменьшение коэффициентов тензочувствительности в результате импульсного отжига не может быть объяснено в рамках существующей модели токового отжига.

## 1. Введение

Влияние импульсного тока отжига (ИТО) на электропроводность поликремниевых резисторов впервые обнаружено в [1], а затем исследовано в ряде работ [2–8]. Было установлено, что после пропускания импульса тока больше некоторого порогового значения в поликристаллическом кремнии с концентрацией носителей заряда порядка  $10^{20}–10^{21}$  см<sup>-3</sup> наблюдается уменьшение сопротивления поликремниевого резистора [1]. Аналогичное изменение сопротивления при пропускании импульсов тока было обнаружено в поликристаллическом Si–Ge, легированном бором с концентрацией примеси  $6 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> [9]. Физическая модель, объясняющая наблюдаемое явление в поликристаллическом кремнии, следующая [2]: при пропускании импульса тока через поликремниевый резистор джоулево тепло в основном выделяется в аморфных слоях на границах раздела кристаллитов, и происходит расплавление этих слоев. Примесь скапливается в расплавленной зоне, и после охлаждения образуется канал с меньшим, чем это было до отжига, сопротивлением. В результате общее сопротивление резистора уменьшается, при этом концентрация носителей заряда, определенная из холловских измерений, остается постоянной [1,2].

Влияние ИТО на пьезосопротивление и электропроводность поликристаллического кремния исследовалось в работах [5–7]. В [5,6] определены продольные ( $S_l$ ) и поперечные ( $S_t$ ) коэффициенты тензочувствительности в поликристаллическом кремнии *p*-типа, было установлено, что после ИТО коэффициенты тензочувствительности растут по абсолютной величине, однако их изменения меньше относительных изменений сопротивлений. В [5,6] на основании результатов ИТО были определены коэффициенты тензочувствительности кристаллитов и барьеров. Описание эффекта пьезосопротивления в поликристаллическом кремнии с помощью коэффициентов пьезосопротивления зерен и барьеров было предложено

в [10], однако, по мнению авторов [11], такой подход является не убедительным.

В работах [1–6] импульсный отжиг проводился одиночными импульсами. Пороговая плотность тока, при пропускании импульса которого начинает наблюдаться эффект уменьшения сопротивления,  $\sim 10^6$  А/см<sup>2</sup> [1,3–6,8,9]. Для достижения указанной плотности тока в [1,3–6,8] резисторы имели толщину порядка 0.5 мкм и ширину не более 20 мкм.

В практическом плане эффект ИТО позволяет изменять величины поликремниевых резисторов после изготовления интегральных схем, что важно, например, для операционных усилителей и тензорезистивных мостов. Для обеспечения большей надежности и управляемости процессом ИТО, величину порогового тока желательно понизить. Можно ожидать уменьшение величины пороговой плотности тока, если разогреть слой поликристаллического кремния до температуры отжига, например, пропуская цуг импульсов тока.

Цель данной работы заключалась в исследовании влияния на электропроводность, эффекты Холла и пьезосопротивление поликристаллического кремния ИТО, происходящего в результате пропускания цуга импульсов тока.

## 2. Экспериментальные результаты

Пленки поликристаллического кремния получены в реакторе пониженного давления при 610 и 625°C на окисленных кремниевых пластинах, ориентированных в плоскости (100). Толщина окисла — 0.43 мкм. Толщины поликремниевых пленок 0.5 мкм. Легирование пленок проводилось имплантацией бора с энергией ионов 50 кэВ и дозой  $\sim 4 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> с последующим отжигом при 1000–1150°C в течение 40 мин. Параметры исследованных пленок приведены в табл. 1. Пленки не имеют текстуры (изотропны).

Для экспериментального определения электрофизических характеристик исследованных слоев на пластинах с помощью фотолитографии были сформированы

<sup>¶</sup> E-mail: lubvml@ngs.ru

Таблица 1. Таблица параметров исследованных до ИТО образцов

№ образца	$\rho_s$ , Ом/□, 24°С	$\rho_v$ , $10^{-3}$ Ом·см, 24°С	$\rho$ , $10^{19}$ см $^{-3}$ , 24°С	$\mu$ , см $^2$ /В·с, 24°С	ТК $\rho_s$ , $10^{-4}$ град $^{-1}$ , 24°С	$T_{gr}$ , °С	$T_{ann}$ , °С	Толщина слоя Si $^*$ , мкм	$d$ , мкм*	$\rho_v$ , $10^{-3}$ Ом·см [12]
1	84	4.62	6.5	21	1.83	610	1000	0.55	6.52	≈ 2
4	51	2.8	6.75	33	7.9		1150	0.55	14.7	≈ 1.8
5, 5-1	65	3.4	7	26.5	5	625	1000	0.525	10.3	≈ 1.7

Примечание. \*  $d$  — средний размер кристаллита в пленке,  $T_{gr}$  — температура роста,  $T_{ann}$  — температура отжига.

тестовые структуры (рис. 1), позволяющие измерять сопротивление, продольный и поперечный коэффициенты тензочувствительности и исследовать эффект Холла. Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  имеют следующие размеры: ширина 50 мкм, длина 500 мкм.

Пластины разрезались на образцы в виде прямоугольных параллелепипедов, длинная ось которых совпадает с направлением [110] кремниевой подложки (рис. 1).

Эффект Холла исследовался на постоянном токе, в постоянном магнитном поле с величиной индукции магнитного поля 1.56 Тл. Ток пропускался через контакты 4 и 8, а холловское напряжение измерялось на контактах 5 и 6.

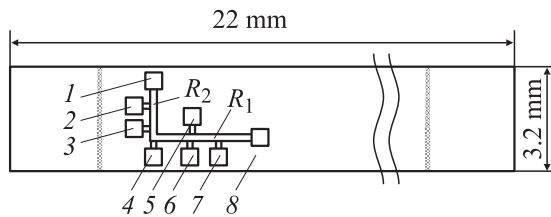


Рис. 1. Балка с продольным и поперечным резисторами.

Коэффициенты тензочувствительности определялись в результате деформации образцов, как жестко закрепленных консольных балок. Измерения коэффициентов тензочувствительности и сопротивления проводились четырехконтактным методом, ток пропускался через контакты 1 и 4 или 4 и 8 от генератора тока, а напряжение измерялось на контактах 2 и 3 или 6 и 7.

Продольный ( $S_l$ ) и поперечный ( $S_t$ ) коэффициенты тензочувствительности определялись из выражений [13]

$$\frac{\Delta U_l}{U_l} = S_l \varepsilon_l + S_t \varepsilon_t, \quad \frac{\Delta U_t}{U_t} = S_t \varepsilon_t + S_l \varepsilon_l,$$

где  $U_l$  — падение напряжения между контактами 6 и 7,  $\Delta U_l$  — изменение падения напряжения между контактами 6 и 7 при действии деформации,  $U_t$  — падение напряжения между контактами 2 и 3,  $\Delta U_t$  — изменение падения напряжения между контактами 2 и 3 при действии деформации,  $\varepsilon_l$ ,  $\varepsilon_t$  — деформации вдоль и поперек резистора.

При этом предполагалось, что деформация полностью передается из подложки поликремниевым резисторам.

Последовательность экспериментальных исследований была следующей. Вначале проводились температурные измерения электропроводности и эффекта Холла. Затем определялись температурные зависимости продольного и поперечного коэффициентов тензочувствительности. После этого проводился ИТО на образцах, находящихся в установке механического нагружения балок. Для стабилизации характеристик образцов проводилось термоциклирование в интервале температур 20–100°С, далее определились коэффициенты тензочувствительности после ИТО и, наконец, исследовались эффект Холла и электропроводность.

ИТО проводился пропусканием цуга импульсов тока величиной 80–100 мА, длительностью 150–250 мкс и скважностью 2–3 через контакты 1 и 4 или 4 и 8 в течение приблизительно 1–2 с. После пропускания импульсов тока измерялось сопротивление  $R_{1-4}$  или  $R_{4-8}$ . Величина порогового тока, как и ожидалось, уменьшалась и составляла  $(3-4) \cdot 10^5$  А/см $^2$ .

### 3. Обсуждение результатов

Сопротивления резисторов после импульсного отжига уменьшались на различную величину в зависимости от времени пропускания цуга импульсов (от нескольких процентов до десятков процентов). На рис. 2 приведены типичные зависимости удельного сопротивления от температуры трех исследованных образцов. Концентрации

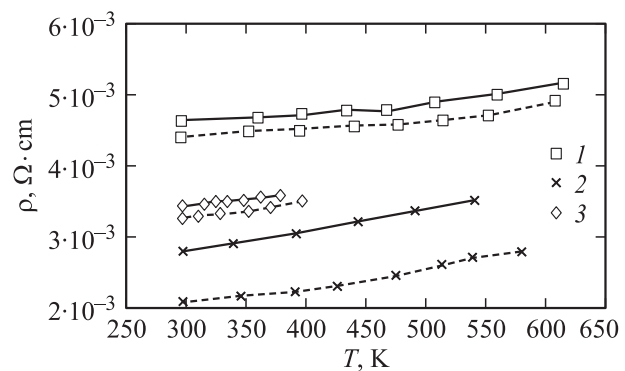
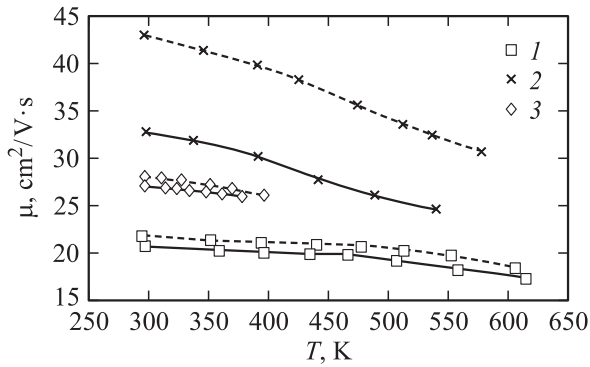
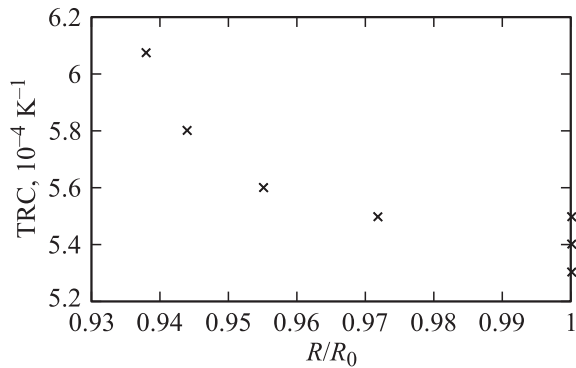


Рис. 2. Температурные зависимости удельного сопротивления до и после ИТО. 1 — образец 1, 2 — образец 4, 3 — образец 5. Сплошная линия — до отжига, штриховая — после отжига.



**Рис. 3.** Температурные зависимости подвижностей дырок до и после ИТО. 1 — образец 1, 2 — образец 4, 3 — образец 5. Сплошная линия — до отжига, штриховая — после отжига.



**Рис. 4.** Зависимость температурного коэффициента сопротивления от отношения сопротивлений до и после ИТО.

дырок после ИТО, как и в [1,3–7], не изменялись в пределах ошибки эксперимента, и изменения удельных сопротивлений связаны с изменением подвижностей дырок. На рис. 3 приведены температурные подвижности дырок до и после ИТО. Из сравнения температурных зависимостей удельных сопротивлений и подвижностей, приведенных на рис. 2 и 3, видно, что они подобны.

Как известно, зависимости подвижности носителей заряда от температуры для большинства механизмов рассеяния могут быть описаны законом

$$\mu = AT^r,$$

где  $A$  и  $r$  — некоторые постоянные.

Оказалось, что характер температурных зависимостей подвижности не изменяется в результате отжига. Это свидетельствует о том, что механизм рассеяния дырок после ИТО изменяется слабо.

На рис. 4 приведены зависимости температурного коэффициента сопротивления (TRC) в зависимости от отношения сопротивлений до ( $R_0$ ) и после ( $R$ ) ИТО образцов из пластины 5. Из рисунка видно, что с увеличением отношения  $R/R_0$  наблюдается увеличение TRC, подобное тому, как это наблюдалось в [3] для образца, легированного бором.

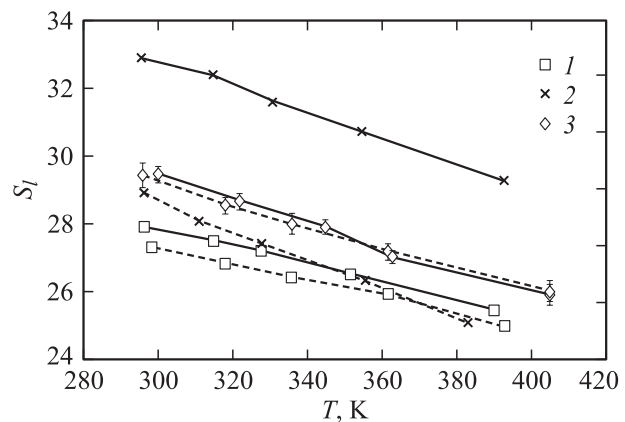
В табл. 2 приведены значения поверхностного сопротивления, концентрации, подвижности носителей заряда, сопротивления между контактами 5 и 6 при комнатной температуре для двух исследованных образцов.

Величина  $R_{5,6}$  складывается из поперечного сопротивления резистора  $R_1$  и сопротивлений отводов для потенциальных контактов. Число квадратов на отводах равно 8. Величина  $R_{5,6}$  приблизительно на 60–70% определяется сопротивлением отводов. Из таблицы видно, что в результате отжига сопротивление  $R_{5,6}$  практически не изменяется, в то время как сопротивления резисторов в перпендикулярном направлении изменяются на 26 и 40%.

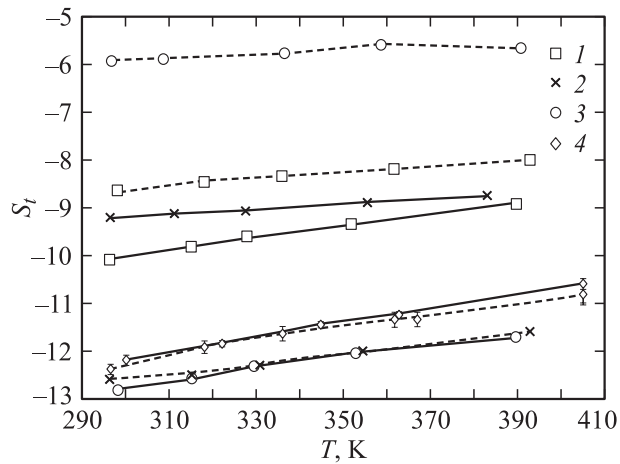
**Таблица 2.**

№ образца	Отжиг	$\rho_s$ , Ом/□	$p$ , $10^{19}$ см $^{-3}$	$\mu$ , см $^2$ /В·с	$R_{5,6}$ , Ом
4	Нет	51.2	6.8	33	630
4	Да	37.8	6.9	46	622
2	Нет	101.7	7.25	17.2	1022
2	Да	59.5	10	20.6	1026

На рис. 5, 6 приведены типичные температурные зависимости коэффициентов тензочувствительности нескольких исследованных образцов до и после ИТО. Сопротивления продольных резисторов образцов 1, 4, 5 в результате ИТО уменьшились соответственно на 5, 35, 3,8%, а сопротивления поперечных резисторов у образцов 1, 4, 5-1, 5 уменьшились соответственно на 14, 15, 30, 3,8%. Из рисунков видно, что после ИТО как продольный, так и поперечный коэффициенты тензочувствительности образцов 1 и 4 уменьшаются. Причем изменения продольных коэффициентов тензочувствительности всегда меньше, чем изменения удельного сопротивления; наклоны графиков температурных зависимостей коэффициентов тензочувствительности до и после ИТО — близки. В случае небольших изменений



**Рис. 5.** Температурные зависимости продольной тензочувствительности до и после ИТО. 1 — образец 1, 2 — образец 4, 3 — образец 5. Сплошная линия — до отжига, штриховая — после отжига.



**Рис. 6.** Температурные зависимости поперечной тензочувствительности до и после ИТО. 1 — образец 1, 2 — образец 4, 3 — образец 5-1, 4 — образец 5. Сплошная линия — до отжига, штриховая — после отжига.

сопротивлений образца 5 после ИТО изменения  $S_l$  и  $S_t$  сравнимы с ошибками эксперимента (рис. 5, 6).

На основе модели токового отжига, предложенной в [2,3], и существующей в настоящее время модели электропроводности в поликристаллическом кремнии может быть объяснено только увеличение абсолютных величин тензочувствительности после ИТО и то только качественно. Так, согласно существующей модели электропроводности, удельное сопротивление поликристаллического кремния определяется удельными сопротивлениями кристаллитов ( $\rho_c$ ) и барьеров ( $\rho_b$ ), например, [11]:

$$\rho = \frac{2w}{L}\rho_b + \left(1 - \frac{2w}{L}\right)\rho_c,$$

где  $L$  — средний размер кристаллита,  $w$  — полуширина заряженного слоя.

Эффект пьезосопротивления в поликристаллическом кремнии при концентрациях носителей заряда  $(6-7) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  определяется в основном зернами, а барьеры вносят незначительный вклад [11,13,14]. Выражения для оценки тензочувствительностей могут быть упрощены, если ось балки, как в нашем случае, имеет направление [110], так как тогда  $\varepsilon_t \approx 0.06\varepsilon_l$ . Поэтому если до и после ИТО коэффициенты тензочувствительности соответственно равны:

$$S_{l,t} = \frac{\Delta\rho_{l,t}}{\rho\varepsilon_l} = \left(1 - \frac{2w}{L}\right) \frac{\Delta(\rho_c)_{l,t}}{\rho\varepsilon_l}$$

и

$$S_{l,t}^* = \frac{\Delta\rho_{l,t}}{\rho^*\varepsilon_l} = \left(1 - \frac{2w}{L}\right) \frac{\Delta(\rho_c)_{l,t}}{\rho^*\varepsilon_l},$$

то

$$\frac{S_{l,t}^*}{S_{l,t}} = \frac{\rho}{\rho^*},$$

и при уменьшении сопротивления резистора тензочувствительность должна увеличиться во столько же раз.

Два факта при исследовании ИТО являются неожиданными. Во-первых, уменьшение поперечного коэффициента тензочувствительности больше уменьшения продольного коэффициента тензочувствительности по абсолютной величине при одинаковом изменении удельного сопротивления в результате ИТО. Во-вторых, даже при больших изменениях удельного сопротивления в результате отжига температурные зависимости подвижности и коэффициенты тензочувствительности если и изменяются, то незначительно. Неожиданными эти факты являются потому, что на границах кристаллитов существуют потенциальные барьеры, которые уменьшают температурный коэффициент сопротивления поликристаллического кремния [11]. Поэтому можно было бы ожидать, что после ИТО температурные зависимости подвижностей и тензочувствительностей изменятся.

Существующие модели электропроводности и ИТО исходят из предположения о движении носителей заряда вдоль одной координаты. Между тем изменение проводимости в результате импульсного токового отжига может приводить к изменению растекания токов в кристаллитах. Эффект пьезосопротивления в кремнии обладает сильной угловой зависимостью, которая может привести к уменьшению коэффициентов тензочувствительности при изменении угловых распределений токов в контактирующих кристаллитах.

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы.

1. В результате ИТО изменение сопротивлений происходит в основном вдоль резисторов.
2. Изменение удельного сопротивления поликристаллического кремния  $p$ -типа связано с изменением подвижности дырок.
3. Температурные зависимости тензочувствительностей не изменяются или изменяются слабо, а подвижности дырок в результате ИТО слабо изменяются.
4. Уменьшение тензочувствительностей в результате ИТО не может быть объяснено в рамках существующей модели ИТО и модели движения носителей заряда вдоль одной координаты.

## Список литературы

- [1] Y. Amemiya, T. Ono, K. Kato. IEEE Trans. Electron. Dev., ED-26, 1738 (1979).
- [2] K. Kato, T. Ono, Y. Amemiya. IEEE Trans. Electron. Dev., ED-29, 1156 (1982).
- [3] K. Kato, T. Ono. Jap. J. Appl. Phys., 35, 4209 (1996).
- [4] С.В. Спутай. *Актуальные проблемы электронного приборостроения. Сенсорная электроника*. Сб. тр. Всес. конф. (Новосибирск, Россия, 1991), с. 33.
- [5] V.A. Gridchin, S.V. Sputay. *11th Int. Conf. On High Vacuum, Interface and Thin Films, HVITF-94* (1994) p. 606.
- [6] В. Спутай. *Тез. докл. 1-й Межд. конф. „Датчики электрических и неэлектрических величин“* (Барнаул, Россия, 1993) ч. 1, с. 95.
- [7] В.В. Грищенко, А.М. Логанихин, В.М. Любимский. Тр. V Межд. конф. „Актуальные проблемы электронного приборостроения“ (Новосибирск, Россия, 2000) т. 4, с. 8.

- [8] D.W. Feldbaumer, J.A. Babcock, V.M. Mercier, C.K.Y. Chun. IEEE Trans. Electron Dev., ED-42, 689 (1995).
- [9] J.F. Babcock, P. Francis, R. Bashir, A.E. Kabir, D.K. Schroder, M.S.L. Lee, T. Dhayagude, W. Yindeepol, S.J. Prasad, A. Kalnitsky, M.E. Thomas, H. Haggag, K. Egan, A. Bergemont, P. Jansen. IEEE Trans. Electron Dev. Lett., 21, 283 (2000).
- [10] P.H. French, A.G.R. Evans. Sol. St. Electron., 32, 1 (1989).
- [11] V. Mosser, J. Suski, J. Goss, E. Obermeir. Sensors Actuators A, 28, 113 (1991).
- [12] S.M. Sze, J.C. Irvin. Sol. St. Electron., 11, 599 (1968).
- [13] D. Schubert, W. Jenschke, T. Uhlig, F.M. Schmidt. Sensors Actuators, 11, 145 (1987).
- [14] В.А. Гридчин, В.М. Любимский. Микроэлектроника, 32, 261 (2003).

*Редактор Л.В. Беляков*

## **Effect of the pulse current annealing on electrophysical characteristics of a *p*-type polycrystalline silicon**

*V.A. Gridchin, V.M. Lubimsky*

Novosibirsk State Technical University,  
630092 Novosibirsk, Russia

**Abstract** The effect of the pulse current annealing on conductivity, concentration, holes mobility and piezoresistance was investigated. To decrease magnitude of threshold current the annealing was carried out using a sequence of current pulses. As a result of the annealing the concentration of holes did not change, the hole mobility increased, absolute values of the longitudinal and transverse gauge factors decreased. The decreasing of gauge factors cannot be explained within the framework of existing model for pulse current annealing.