

Немонотонный характер зависимости сопротивления пленок поликристаллического кремния от температуры роста

© Д.В. Шенгуров, Д.А. Павлов, В.Н. Шабанов, В.Г. Шенгуров, А.Ф. Хохлов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603600 Нижний Новгород, Россия

(Получена 10 июня 1997 г. Принята к печати 2 октября 1997 г.)

Исследовано влияние температуры подложки T_s на слоевое сопротивление R_s для пленок поликристаллического Si, полученных методом молекулярно-лучевого осаждения. Обнаружен немонотонный характер зависимости R_s от T_s для пленок, легированных разными примесями в процессе осаждения. Предложено объяснение полученным экспериментальным результатам на основе модифицированной модели Сетто.

Введение

Пленки поликристаллического кремния (ППК) находят широкое применение при изготовлении тонкопленочных транзисторов, солнечных элементов и интегральных резисторов [1–3]. Широкими возможностями при варьировании свойств ППК обладает метод молекулярно-лучевого осаждения (МЛО) [4–6]. Он позволяет получать ППК при низкой температуре роста и независимо менять в широких пределах скорость роста, сорт и поток легирующей примеси, а также использовать некоторые стимулирующие рост пленок факторы (например, приложение к подложке ускоряющего потенциала).

В данной работе приведены результаты исследования изменения слоевого сопротивления ППК, выращенных методом МЛО, в зависимости от температуры роста и типа легирующей примеси.

Методика эксперимента

Осаждение слоев проводилось методом МЛО с использованием сублимирующих источников Si [4]. Источниками паров Si и легирующей примеси служили прямоугольные пластины размером $75 \times 5 \times 0.8 \text{ мм}^3$, вырезанные из монокристаллов легированного Si. Источники были выбраны с такой концентрацией примеси, которая позволяла бы получать близкие по величине ее потоки. Вычисленные значения потоков примесей, используемых в данном эксперименте, приведены в таблице. Поток Si составлял $2 \cdot 10^{16} \text{ ат/см}^2 \cdot \text{с}$. Источник разогревался пропусканием тока до рабочей температуры порядка 1380°C . Подложками служили пластины Si, покрытые слоем термически выращенного окисла толщиной $t \approx 0.4 \text{ мкм}$. Толщина выращенных поликристаллических пленок Si составляла 0.15 и 1.5 мкм.

Поток легирующей примеси из кремниевого источника

Тип примеси:	As	Sb	Al	Ga	B
Величина потока, ат/см ² · с	$6 \cdot 10^{12}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$1.6 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{12}$

Структура слоев контролировалась с помощью дифракции электронов на отражение и прохождение. В пленках толщиной $d = 0.15 \text{ мкм}$ размер области когерентного рассеяния (ОКР) определялся по угловому уширению дифракционных максимумов ΔS по формуле Шеррера:

$$D = 4\pi k / \Delta S, \quad (1)$$

где $k \approx 1$ — постоянная Шеррера. Морфологию поверхности пленок исследовали с помощью электронной микроскопии на угольных репликах. Слоевое сопротивление ППК измерялось стандартным четырехзондовым методом.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены дифрактограммы пленок толщиной $d = 0.15 \text{ мкм}$, выращенных при температурах подложки $T_s = 400$ и 450°C . Видно, что переход от наращивания пленок с аморфной структурой к пленкам с поликристаллической структурой происходит в этом интервале температур. Следует отметить, что в этом же интервале температур наблюдался переход к эпитаксиальному наращиванию на монокристаллической подложке в методе сублимации Si [7]. Изменение размера ОКР и размера зерна в зависимости от температуры роста пленок приведено на рис. 2.

При исследовании пленок толщиной 1.5 мкм, выращенных при $T_s > 500^\circ\text{C}$, установлено, что они растут с достаточно четко выраженной текстурой в направлении роста (110). Причем с повышением температуры роста угловой разброс текстуры уменьшается. Так, для пленок, выращенных при 570°C , угловой разброс составлял 58° , а в выращенных при 640°C — 17° .

Изменение структурно-морфологических свойств ППК в зависимости от температуры осаждения прослеживается на рис. 3. Например, в легированных мышьяком пленках при низких температурах $T_s \approx 550^\circ\text{C}$ растут пленки с округлыми и однородными по размеру зернами. При повышении T_s наблюдается укрупнение размера зерна. Дальнейшее повышение температуры роста ($T_s \approx 650^\circ\text{C}$) приводит к усилению рельефности поверхности пленок. Зерна при этом приобретают полиэдрическую форму, а их размер становится

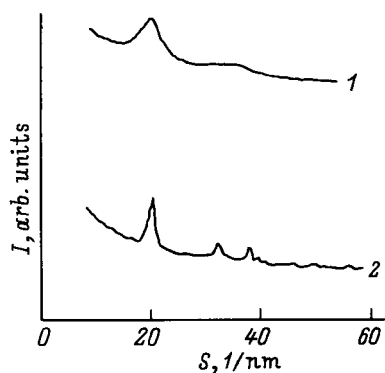


Рис. 1. Дифрактограммы кремниевых пленок, выращенных при температурах подложки T_s , °C: 1 — 400, 2 — 450.

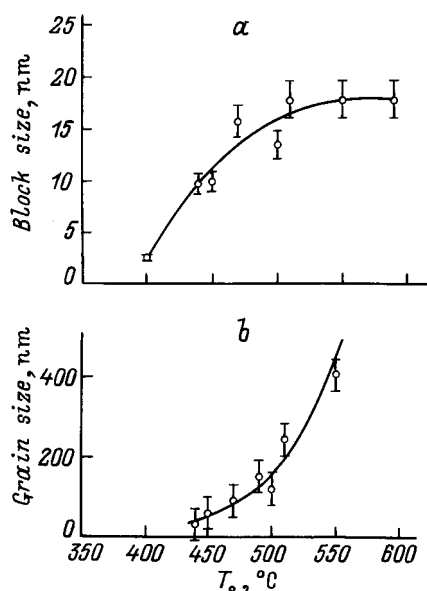


Рис. 2. Зависимость размера областей когерентного рассеяния (а) и размера зерна поликристаллических пленок Si (b) от температуры роста T_s .

сравним с толщиной пленки ($d \approx 1 \mu\text{м}$). Для ППК, легированных другими примесями, структурно-морфологические свойства изменяются с температурой роста аналогичным образом. Исключение составляют пленки, легированные Al. При температуре роста $590 \pm 10^\circ\text{C}$ в пленках наблюдались зерна размером до $10 \mu\text{м}$ при среднем их размере $4.2 \mu\text{м}$, что значительно превышало толщину пленки.

На рис. 4 приведены данные по зависимостям слоевого сопротивления ППК (R_s) и выращенных в аналогичных условиях на ориентированной подложке эпитаксиальных пленок Si одинаковой толщины от температуры подложки T_s . Для всех легирующих примесей зависимости $R_s(T_s)$ у ППК существенно немонотонные. Для акцепторных примесей минимум $R_s(T_s)$ имеет место в диапазоне температур роста $T_{s \min} \approx 580\text{--}610^\circ\text{C}$, а для донорных — при $T_{s \min} \approx 530^\circ\text{C}$. В то же время для монокристаллических пленок сопротивление R_s в исследуемом диапазоне

температур практически постоянно и существенно ниже минимального значения R_s для ППК. Исключение лишь составляют легированные алюминием ППК, в которых минимальное значение R_s практически совпадает с R_s монокристаллических пленок.

На отдельных ППК были измерены температурные зависимости слоевого сопротивления при понижении температуры от комнатной до температуры жидкого азота. Наблюдаемые зависимости для большинства образцов

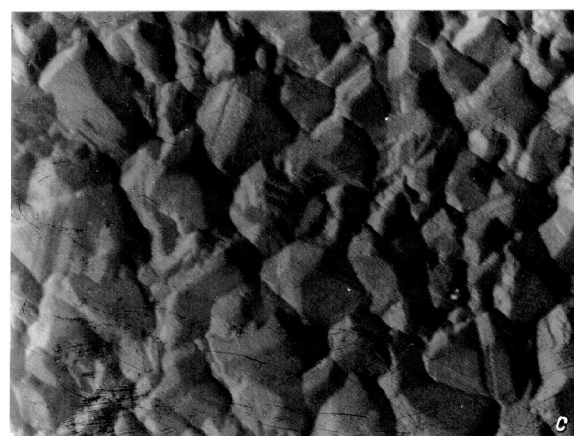
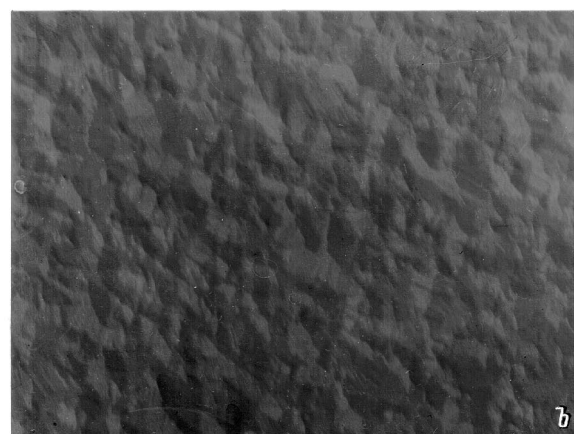
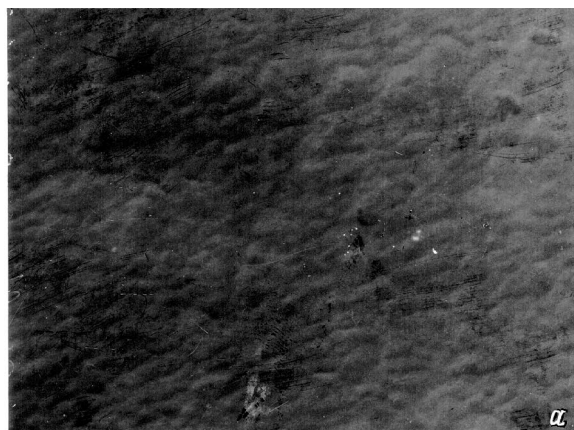


Рис. 3. Микрофотографии угольных реплик от поверхности поликристаллических пленок Si, снятые на электронном микроскопе ($\times 15000$). Температура роста T_s , °C: а — 550, б — 600, с — 650.

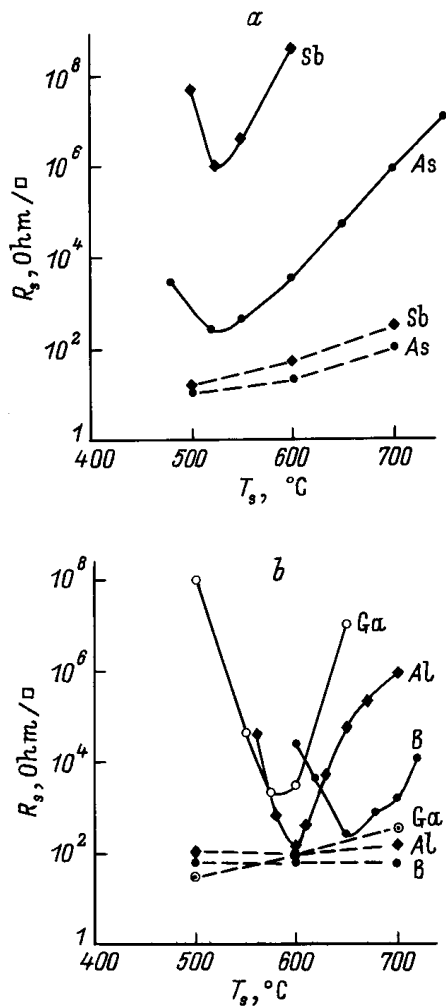


Рис. 4. Зависимость слоевого сопротивления поликристаллических пленок Si, легированных донорными примесями (а) и акцепторными примесями (б), от температуры роста T_s . Пунктиром обозначены аналогичные зависимости для монокристаллических пленок (данные взяты из работы [10]).

имели вид

$$R_s \sim \exp(-E/kT), \tag{2}$$

где E — энергия активации, которая коррелирует с величиной R_s при комнатной температуре: чем выше R_s , тем больше E . При минимальных значениях R_s независимо от сорта легирующей примеси $E \leq 0.05$ эВ, а для высокоомных пленок ($c R_s \geq 10^8$ Ом/□) $E = 0.45 \div 0.5$ эВ.

Наблюдаемые изменения сопротивления пленок в зависимости от температуры роста качественно можно объяснить в рамках модифицированной модели Сетто [8,9] для частично обедненных зерен. Выражение для удельного сопротивления

$$\rho = \frac{kN_c}{q\langle a \rangle ATN_G} \exp(qV_B/kT), \tag{3}$$

где $\langle a \rangle$ — средний размер зерна, N_G — концентрация электрически активной легирующей примеси, V_B — вы-

сота барьера на границе зерен, A — константа Ричардсона, q — заряд электрона, $N_c \sim T^{3/2}$ — эффективная плотность состояний. Высота барьера [9]

$$V_B = Q_i^2 / (8\epsilon\epsilon_0 q N_G), \tag{4}$$

где Q_i — заряд границы раздела зерна.

В области температур подложки $500^\circ\text{C} \leq T_s \leq T_{s\text{min}}$ наблюдается рост размера зерен $\langle a \rangle$ и улучшение качества границ. В связи с этим уменьшается Q_i , что и приводит к уменьшению V_B и ρ . В области $T_s \approx T_{s\text{min}}$ размер зерна практически достигает своего максимального значения, а сопротивление — своего минимального значения. По мере дальнейшего повышения температуры роста, по-видимому, включаются механизмы, уменьшающие концентрацию электрически активной примеси: сегрегация примеси на дефектах и межзеренных границах и ее неполный перенос в процессе роста из источника в слой [10]. В результате V_B начинает расти и это приводит к повышению R_s . Именно слабой сегрегацией В в Si мы объясняем более высокое значение $T_{s\text{min}}$ для пленок, легированных этой примесью.

Заключение

Проведено исследование зависимости слоевого сопротивления поликристаллических пленок Si, легированных различными примесями в процессе молекулярно-лучевого осаждения, от температуры роста. В отличие от монокристаллических пленок, где сопротивление практически постоянно в исследуемом диапазоне температур, эта зависимость носит немонотонный характер: для акцепторных примесей минимум зависимости $R_s(T_s)$ имеет место при $T_{s\text{min}} = 580 \div 610^\circ\text{C}$, а для донорных — при $T_{s\text{min}} \approx 530^\circ\text{C}$.

Список литературы

- [1] M.K. Hatalis, D.M. Greve. IEEE Electron. Dev. Lett., **EDL-8**, 361 (1987).
- [2] Z. Shi, S.R. Wenham. Prog. Photovolt., **2**, 153 (1994).
- [3] P.H.L. Rasky, D.W. Greve, M.H. Kryder, S. Dutta. J. Appl. Phys., **57**, 4077 (1985).
- [4] Д.А. Павлов, В.Г. Шенгуров, Д.В. Шенгуров, А.Ф. Хохлов. ФТП, **29**, 286 (1995).
- [5] N.K. Annamalai et al. Thin Sol. Films, **155**, 97 (1987).
- [6] M. Matsui, Y. Shiraki, E. Maruyama. J. Appl. Phys., **53**, 995 (1982).
- [7] В.П. Кузнецов, В.В. Постников, Т.Д. Комарова, Е.А. Розанова, Т.Н. Стрижева, Т.М. Зотова. Кристаллография, **20**, 626 (1975).
- [8] J.Y.W. Setto. J. Appl. Phys., **46**, 5247 (1975).
- [9] Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применения (М., Мир, 1989) с. 244. [Пер. с англ.: Polycrystalline Semiconductors. Physical Properties and Application, ed. by G. Harbeke (Berlin e. a., 1985)]
- [10] В.П. Кузнецов, В.В. Постников. Кристаллография, **19**, 346 (1974).

Редактор Т.А. Полянская

Unmonotonous dependence of polycrystalline silicon films sheet resistance from growth temperature

D.V. Shengurov, D.A. Pavlov, V.N. Shabanov,
V.G. Shengurov, A.F. Khokhlov

State University of Nizhni Novgorod,
603600 Nizhni Novgorod, Russia

Abstract Influence of substrate temperature T_s on sheet resistance R_s of polycrystalline silicon films that were received by molecular beam evaporation method is investigated. It is found out an unmonotonous character of $R_s(T_s)$ dependence for films doped with different impurities throughout the evaporation process. The explanation of the received experimental results on the basis of modified model Setto is offered.