



УДК: 537.533.537.534;

Алланазар ТАШАТОВ,
Профессор Каришинского государственного университета, д.ф.-м.н
E-mail: atashatov@mail.ru
Сардор ЭШБОБОВ,
Базовый докторант Каришинского государственного университета
Ёкуб ЭРГАШОВ,
Профессор Национального университета Узбекистана, д. ф.-м.н

APPLICATION OF ION IMPLANTATION FOR CREATION OF ULTRATHIN OHMIC CONTACTS ON THE SURFACE OF SILICON FILMS

Аннотация

It has been established that in these systems the low value of resistivity is due to both the high degree of doping of the near-surface layer and the low height of the Schottky barrier. Thus, the preliminary implantation of Ba⁺ ions in Si makes it possible to obtain sufficiently reliable ohmic contacts.

Key words: contact, surface, layer, films, morphology, resistance, doping, ion implantation, thermal annealing, silicide, distribution profile, diffusion, Schottky barrier, laser annealing.

ПРИМЕНЕНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УЛЬТРАТОНКИХ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНОК КРЕМНИЯ

Аннотация

Установлено, что в указанных системах малое значение удельного сопротивления обуславливается как высокой степенью легирования приповерхностного слоя, так и малой высотой барьера Шоттки. Таким образом, предварительная имплантация ионов Ba⁺ в Si позволяет получить достаточно надежные омические контакты.

Ключевые слова: контакт, поверхность, слой, пленок, морфология, сопротивление, легирования, ионная имплантация, температурный отжиг, силицид, профиль распределения, диффузия, барьер Шоттки, лазерный отжиг.

KREMNIY SIRT YUZASIDA ULTRAYUPQA OMIK KONTAKTLAR YARATISH UCHUN ION IMPLANTASINI QO'LLASH

Аннотация

Ushbu maqolada aniqlanishicha, bu tizimlarda qarshilikning past qiymati ham sirtga yaqin qatlamning yuqori darajada legirlanishi, hamda Shottki to'sig'ining balandligi pastligi bilan bog'liq. Shunday qilib, Si ga Ba⁺ ionlarining dastlabki implantatsiyasi natijasida yetarlicha ishonchli omik kontaktlarni olish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: kontakt, sirt, qatlam, plyonkalar, morfologiya, qarshilik, doping, ion implantatsiyasi, termik tavlaniish, silitsid, tarqalish profili, diffuziya, Shottki to'sig'i, lazerli tavlaniish.

Введение. Одной из основных проблем микроэлектроники, особенно в системах БИС и УБИС, является создание надежных контактов. Эти системы состоят из множества разнообразных транзисторов, в частности, транзисторов с проникающей и металлической базой, созданных с применением слоев субмикронной толщины.

К контактам (контактирующему материалу), создаваемым на поверхности субмикронных слоев, предъявляются более высокие требования, чем к контактам для "толстых" пленок. Эти требования становятся гораздо более жесткими, если контакты создаются для высокочастотных транзисторов. Основными требованиями следующие:

- малая толщина переходного слоя металл-кремний;
- морфологическое совершенство пленки и неизменность фазового состава на всей площади контакта;
- стабильность свойств контактов в процессе изготовления и эксплуатации.

Литературный обзор. Омический контакт характеризуется удельным сопротивлением, значение которого определяется через полное сопротивление R_c [1-3].

$$R_c = (\rho_{II}/\pi d) \cdot f \cdot g^{-1} (4h/d) + (4\rho_c/\pi d^2) + R_0 \quad (1)$$

где, ρ_{II} – удельное сопротивление полупроводниковой пленки, h – толщина пленки, d – диаметр кругового контакта, f – частота генерации, g – активная межэлектронная проводимость, R_0 – сопротивление тыльного контакта.

Хороший омический контакт должен иметь $\rho_k < 10^{-2}$ Ом-см. Удельное сопротивление контакта есть обратная величина производной плотности тока по напряжению

$$\rho_k = (dI/dV)^{-1} V = 0 \quad (2)$$

В настоящее время существует несколько способов получения сверхмелких контактов на субмикронных структурах: метод фазового расслоения; метод низкоэнергетического ионного легирования; метод осаждения многослойных композиций.

Независимо от метода создания контакта значение ρ_k зависит от уровня легирования полупроводника. В контактах "металл-полупроводник" с низким уровнем легирования преобладает термоэлектронная компонента тока. При этом согласно термоэмиссионно-диффузионной теории, ρ_k определяется по формуле:

$$\rho_k = \frac{k}{eA^*T} \exp\left(\frac{e\phi_{on}}{kT}\right) \quad (3)$$

где, k - постоянная Больцмана, e - заряд электрона, A^* - эффективная постоянная Ричардсона, $\phi_{\text{ш}}$ - высота барьера Шоттки.

Из формулы 3 следует, что в случае полупроводников с низким уровнем легирования для получения малых ρ_K нужно изготовить контакт с малой высотой барьера.

В контактах "металл-полупроводник" с высоким уровнем легирования преобладает туннельная компонента тока, поэтому ρ_K будет пропорционально выражению

$$\rho_K \approx \exp \left[\frac{2\sqrt{\epsilon_s m^*}}{h} \cdot \left(\frac{\phi_{\text{ш}}}{\sqrt{N_D}} \right) \right], \quad (4)$$

где, m^* - эффективная масса электрона, ϵ_s - диэлектрическая постоянная пленки, N_D - концентрация примесных уровней.

Анализ формул (3 и 4) показывает, что при $N_D < 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ток обусловлен термоэмиссией и значение ρ_K почти не зависит от уровня легирования, а при $N_D > 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ρ_K определяется, в основном, туннельными процессами и быстро уменьшается по мере повышения степени легирования.

Таким образом, для получения хороших омических контактов с малым ρ_K необходимы либо высокая степень легирования, либо малая высота барьера, либо, и то и другое. Основным требованием, предъявляемым к субмикронным контактам, помимо низкого ρ_K , является ограниченная глубина переходного слоя и однородность поверхности.

По сравнению с другими методами создания сверхмелких контактов, ионная имплантация обладает определенными преимуществами и обеспечивает получение хорошо воспроизводимых и однородных структур.

Методика исследования. В настоящее время для получения омических контактов к Si с использованием ионной имплантации чаще всего используется следующий способ [2,4]. Для устранения эффекта каналирования поверхность Si сначала аморфизуется ионами Ge (или Si), а затем вводятся ионы B^+ (или P^+). Послеимплантационный отжиг проводится высокотемпературным прогревом ($T \approx 1100-1300 \text{ K}$) в течение 10-15 с. Затем проводится металлизация: вводится 160 нм Ti и 800 нм Al. Послеметаллизационный отжиг производится в атмосфере Ag в течение 30-40 с при температуре 620-650 K.

Однако, изложенный метод не является высокоэффективным, так как он требует проведения последовательности разнообразных сложных технологических операций, после которых вблизи переходного слоя остается заметная концентрация дефектов.

В последние годы разработан низкотемпературный метод введения большой концентрации примеси ($10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$) на небольшую (100 нм) глубину. В этом методе реализуется атермическая кристаллизация ионно-легированного слоя, называемого также "эффектом больших доз имплантации" [4,5]. Осуществляется имплантация примесей типа P, B, As в кремний с большой плотностью ионного тока (30 - 100 мкА·см⁻²). При малых дозах идет аморфизация приповерхностного слоя, а затем при больших дозах ($D \geq 10^{14} \text{ см}^{-2}$) происходит ориентационная кристаллизация разупорядоченного слоя [4].

При таких дозах легирования концентрация носителей в максимуме распределения превышает 10^{20} см^{-3} . Однако, при этом имплантация проводится ионами сравнительно высоких энергий ($E_0 \geq 15-20 \text{ кэВ}$). Это резко уменьшает плотность ионного тока затрудняет реализацию эффекта или даже делает его невозможным. Поэтому в работах [2] легирование кремния осуществлялось путем введения необходимой концентраций примеси (P или B) в тлеющем разряде. Количество внедренного фосфора (бора) контролируется по изменению тока разряда при введении паров фосфора, т.е. по изменению давлений в разрядной камере.

В данной работе мы попытались создать омические контакты на поверхности сверхтонких пленок ($\leq 500 \text{ Å}$) Si/CoSi₂ с использованием имплантации ионов Ba^+ . Для этого проводились следующие технологические операции: пленки Si легировались ионами Ba^+ с вариацией энергий ионов в следующей последовательности 5, 3, 1 и 0,5 кэВ. Во всех случаях доза ионов составляла $(4 \div 6) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. При этом высота потенциального барьера пленка-контакт уменьшалась до 0,35 - 0,4 эВ. Затем проводился послеимплантационный отжиг [5]. Кристаллизация разупорядоченного слоя пленки в случае лазерного облучения начиналась при плотности энергии $W \approx 1 \div 1,5 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$, а в случае температурного прогрева - при $T \approx 1000 \text{ K}$. Увеличение W до 2,5 Дж·см⁻² приводило к формированию монокристаллической структуры, но с большой плотностью структурных дефектов. Дальнейший рост W сопровождался разложением BaSi и обогащением поверхности атомами бария. Поэтому после лазерной обработки проводился быстрый температурный отжиг (~10 с) при $T=1200 \text{ K}$. Это позволило получить более совершенную монокристаллическую структуру силицида.

Анализ и результаты. В случае температурного отжига увеличение T до 1100 K позволило получить монокристаллическую структуру. Но при этом в определенной мере сохранялись дендритовые блоки. Дальнейший рост T приводил к образованию островковой пленки.

На рис.1. представлен концентрационный профиль распределения Ba по глубине ионно-легированного кремния до и после отжига. Видно, что лазерный отжиг с $W \approx 2,5 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ приводит к образованию однородного слоя силицида в тонкой приповерхностной области, а температурный отжиг - к монотонному уменьшению концентрации бария от поверхности до определенной глубины.

Исследовалась основная характеристика контакта - удельное сопротивление переходного слоя и его зависимость от температуры. Необходимость знания такой зависимости прежде всего связана с особенностями технологического получения p-n переходов, гетероструктур, контактов и транзисторов в целом. Все эти процессы сопровождаются прогревом системы до определенной температуры.

На рис.2. приведена зависимость $\rho(T)$ для приповерхностного силицидного слоя, полученного имплантацией ионов Ba^+ с разными энергиями ($E_0 = 5, 3, 1, 0,5 \text{ кэВ}$) в кремний. Видно, что все эти зависимости имеют минимум в области $T \approx 1000-1100 \text{ K}$. При низких температурах значение ρ сравнительно высокое. В случае отожженных

образцов это в основном связано с адсорбцией на поверхности и некоторой диффузией в приповерхностную область атомов различных газов.

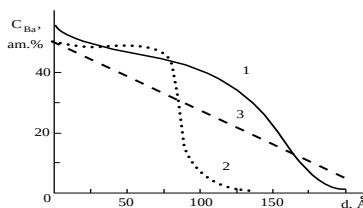


Рис.1. Зависимость C_{Ba^+} от d для Si, легированного ионами с энергией 5, 3, 1 и 0.5 кэВ при $D \approx 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^2$. 1-до отжига; 2-после лазерного отжига с $W=2.5 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$; 3-после прогрева при $T=1100 \text{ K}$.

В случае неотожженного образца высокое значение ρ при низких T главным образом обусловлено некристаллическостью ионно-легированного слоя и наличием большого числа структурных дефектов на границе силицид-кремний.

Затем для получения омического контакта на поверхность силицидов бария напылялись атомы контактирующего металла.

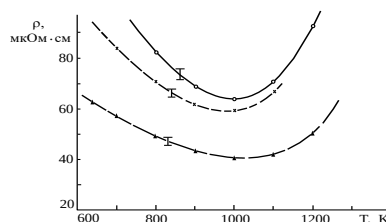


Рис.2. Зависимость удельного сопротивления силицидного переходного слоя от температуры для Si, легированного ионами Ba^+ .

На рис.3. приведен профиль распределения Ni по глубине ионно-легированного кремния. Ni напылялся на образец до и после отжига образца. Видно, что в случае отожженных образцов диффузия Ni происходит заметно, интенсивнее, чем для неотожженной структуры. Однако, во всех случаях глубина проникновения Ni небольшая и не превышает 100-150 Å.

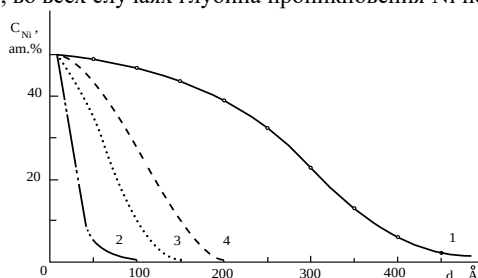


Рис.3. Зависимость C_{Ni} по глубине чистого и ионно-легированного кремния. 1-Ni-чистый Si<100>; 2-Ni- $Ba^+ \rightarrow Si<100>$ ($E_0=5 \div 0.5 \text{ кэВ}$, $D=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^2$); 3-Ni- $Ba^+ \rightarrow Si<100>$ (лазерный отжиг $W=2.5 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$); 4- Ni- $Ba^+ \rightarrow Si<100>$ (прогрев $T=1100 \text{ K}$).

Выводы/рекомендации. Дальнейшие наши исследования показали, что качество омического контакта слабо зависит от предварительной обработки ионно-легированного слоя (табл.1).

Таблица 1.

Значение удельного сопротивления и высота барьера Шоттки для системы

$Ni-Ba^+ \rightarrow Si$

Параметры системы	Ni- $Ba^+ \rightarrow Si$ (111)		
	Неотожженная структура	Температура $T=1100 \text{ K}$	Плотность энергии лазерного облучения $2.5 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$
ρ , мкОм·см	1,6	1,3	1,2
ϕ_B , эВ	0,6	0,4	0,4

Значения ρ и ϕ_B измерены при комнатной температуре мишени. Отметим, что в указанных системах малое значение удельного сопротивления обуславливается как высокой степенью легирования приповерхностного слоя, так и малой высотой барьера Шоттки. Таким образом, предварительная имплантация ионов Ba^+ в Si позволяет получить достаточно надежные омические контакты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Walden R.H.et.al The buried Channel Coupled Device.// Bell. Sist.Tech.J., - 1972. - V.51. - P. 180-183.
2. Wittmer M. Silicide contacts for shallow junction devices. //Thin Solid Films. - 1983. - V.107. - P. 99-110.
3. "Мелкие переходы для солнечных батарей, изготовленных в короне разряда в атмосфере BF_3 ", R.Wicher, IEEE, Photovoltaic Specialists Conf. - 1975. - 420 p.
4. Tusa J.E. Di, Parpia J.M. Quantum transport in ultrathin $CoSi_2$ epitaxial films. // Appl. Phys. Lett. - 1990. - V.57 (5). - P.452-454.

5. Ташатов А.К. Применение низкоэнергетической ионной имплантации для создания контактов к ультратонким пленкам. // Украинский физический журнал. - Киев, 2001. - №3 (46). – С. 383-385.
6. Ergashov Y.S., Tashmukhamedova D.A., Rabbimov E. // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. -Russia, 2015, -Vol. 9, №2, -P.350–354. © Pleiades Publishing, Ltd.
7. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. Электронная спектроскопия нанопленок и наноструктур, созданных ионной имплантацией. – Ташкент: ТашГТУ, 2004. – 147 с.
8. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Tashatov A.K., Mustafoeva N.M., Muradkabilov D.M. // Effect of the Disordering of Thin Surface Layers on the Electronic and Optical Properties of Si(111) // Semiconductors, 2020, 54(11), стр. 1424-1429
9. Donaev S.B. Tashatov A.K. Mustafoeva N.M. // Electronic and Optical Properties of GaAlAs/GaAs thin films // Technical Physics, Vol.64, Issue 10(2019), pp.1506-1508
10. Tashatov A.K. Mustafoeva N.M. // Surface Morphology of NiSi₂/Si Films Obtained by the Method of Solid-Phase Deposition // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol.14, No 1, pp. 81-84.
11. Ташатов А.К. Мустафоева Н.М. // Морфология, состав и структура поверхности пленок NiSi₂/Si полученных методом твердофазной эпитаксии // Узбекский физический журнал, 23(2), 2021. С.55-60