



Symposium on Natural and Applied Sciences

Hosted Online from London, United Kingdom

Date: 5th April, 2026

Website: <https://econferencia.com>

АКУСТОСТИМУЛИРОВАННОЕ ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИИ Au–nSI КОНТАКТОВ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Гаибов Абдумалик Гайбуллаевич

канд.ф-м.н., проф., Ташкентский государственный технический
университет, Ташкент, ул. Университетская 2Б

Рустамов Шохзод Шухратович

студенту, Ташкентский государственный технический университет,
Ташкент, ул. Университетская 2Б

Раимов Сардор Эркин угли

Ташкентский государственный технический университет,
Ташкент, ул. Университетская 2Б

Аннотация:

В работе исследовано влияние ультразвуковых волн на адгезионную прочность золотых плёнок к кремнию n-типа при комнатной температуре ($T \approx 300$ K). Эксперименты показали, что ультразвуковое воздействие приводит к значительному увеличению контактной разности потенциалов и напряжённости электрического поля между Au-плёнкой и Si-подложкой, что обуславливает рост адгезионной прочности более чем в 10 раз. Основным механизмом повышения адгезии является акустостимулированное увеличение концентрации ионизированных центров в приповерхностной области полупроводника. Полученные результаты открывают перспективы создания прочных Au–Si контактов без высокотемпературного термоотжига.



Symposium on Natural and Applied Sciences

Hosted Online from London, United Kingdom

Date: 5th April, 2026

Website: <https://econferencia.com>

RUSTAMOV SHONZOD SHUXRATOVICHВ последнее время разрабатываются новые методы создания металлических контактов к полупроводникам при комнатных температурах ($T \approx 300$ K). Одним из таких методов является улучшение адгезионной прочности металлических пленок меди (Cu) и никеля (Ni) к кремнию с помощью ультразвука. Существуют лишь несколько работ, посвящённых исследованиям в этом направлении [1,2,3]. Причём увеличение адгезионной прочности контактирующих пар Si–Cu и Si–Ni достигалось под воздействием ультразвука при температурах в области контакта металл–полупроводник, не превышающих $T \leq 300$ K.

Золото, в отличие от Cu и Ni, имеет особое практическое значение: оно может использоваться как примесь для получения полупроводникового материала с заданным временем жизни τ и удельным сопротивлением, а также как материал для электрических контактов. В частности, золото используется как фронтальный контакт на «входном» окне Si-фотоприёмника и одновременно защищает окно от агрессивного воздействия внешней среды. Исходя из вышесказанного, проблема создания высококачественных Au-контактов к кремнию при $T \approx 300$ K является актуальной.

Цель настоящих экспериментов заключалась в исследовании влияния ультразвуковых волн на адгезионную прочность пленок Au к кремнию n-типа с удельным сопротивлением $\rho \approx 100\text{--}200$ $\Omega\cdot\text{см}$ и временем жизни носителей $\tau \approx 500\text{--}600$ мкс при температуре $T = 300$ K.



Symposium on Natural and Applied Sciences

Hosted Online from London, United Kingdom

Date: 5th April, 2026

Website: <https://econferencia.com>

Под термином «адгезионная прочность» понимается сила адгезионного взаимодействия, определяемая путем отрыва пленок, численно равная силе внешнего воздействия, нарушающего адгезионную связь между субстратом и пленкой. Изучалась адгезионная прочность Au-пленок к кремнию до и после ультразвуковой обработки. На Si-пластины диаметром $d = 28$ мм и толщиной $h \leq 1$ мм после механической и химической обработки методом вакуумного напыления формировались Au-пленки. Термоотжиг структуры Si–Au не производился. Толщина пленок l определялась эллипсометрическим методом и составляла $l = 1,5–3$ мкм.

Адгезионная прочность P_0 и P до и после воздействия ультразвуковых волн с частотой $f = 0,8–15$ МГц и интенсивностью $I^* = 0–10$ Вт/см² изучалась методом нормального отрыва [95, с. 279]. В этом методе сила отрыва направлена перпендикулярно к площади контакта адгезив (Au-пленка) – субстрат (Si-подложка) (см. рис.1).

Для определения адгезионной прочности P используют формулу [4]:

$$P = \frac{F_{\text{отр}}}{\pi r^2}$$

где $F_{\text{отр}}$ — внешняя сила отрыва, r — радиус торца штифта, приклеенного к адгезиву. Облучение Au–Si-системы ультразвуковыми волнами производилось со стороны Au-пленки. Теоретические расчёты [5] показывают, что на величину адгезии в системах металл–полупроводник существенное влияние оказывает контактная разность потенциалов V_k , зависящая от числа ионизированных центров и напряжённости электрического поля E между контактирующими поверхностями.



Symposium on Natural and Applied Sciences

Hosted Online from London, United Kingdom

Date: 5th April, 2026

Website: <https://econferencia.com>

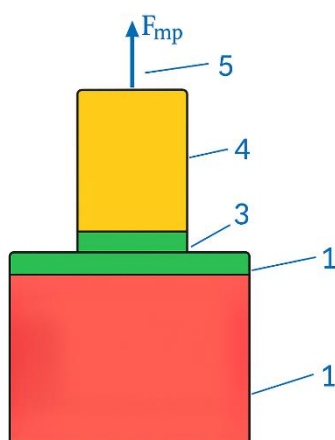


Рис.1. Метод нормального отрыва, используемый для определения адгезионной прочности: 1-субстрат (Si-подложка); 2-адгезив (металлическая пленка); 3-клей; 4-штифт; 5-направление силы отрыва $F_{отр}$.

Контактная разность потенциалов при адгезии металла и полупроводника определяется формулой[4]:

$$V_k = \left[2S_0 \left(\frac{\kappa kT\varepsilon}{q} \right) Sh \frac{\varphi}{2} + \pi q Sh \varphi \right] + \frac{kT}{q} \quad (1)$$

где S_0 — расстояние между контактирующими телами; κ — дебаевский радиус; k — постоянная Больцмана; ε — диэлектрическая проницаемость; s — поверхностное состояние (или число ионизированных центров); φ — средний изгиб зон у свободной поверхности полупроводника.

Оценки показывают, что для $V_k \approx 0,1$ В, $s \approx 10^{13}$ см⁻², $S_0 \approx 5 \cdot 10^{-8}$ см, $\kappa \approx 10^4$ см⁻¹, $kT = 4,16 \cdot 10^{-21}$ Дж, $T = 300$ К и $\varepsilon \approx 10$ напряжённость электрического поля $E \approx 2 \cdot 10^6$ В/см. Для $V_k \approx 0,3$ В поле E возрастает до $E \approx 6 \cdot 10^6$ В/см.



Symposium on Natural and Applied Sciences

Hosted Online from London, United Kingdom

Date: 5th April, 2026

Website: <https://econferencia.com>

Адгезионная прочность P_0 в этих условиях определяется формулой [4]:

$$P_0 = \frac{\varepsilon E^2}{8\pi} = \sqrt{2\varepsilon} \cdot \sqrt{N_d} \cdot \left[\frac{\left(\frac{2\pi m^*}{S_0^2} \right)^{\frac{3}{4}}}{(kT)^{\frac{7}{4}}} \right] \cdot \exp \left[\frac{2V_k - \Delta E}{2kT} \right] \quad (2)$$

где N_d — концентрация донорных примесей; m^* — эффективная масса электрона; ΔE — энергетический зазор между уровнем примесей и зоной проводимости. Этот механизм дополнительно увеличивает P_0 после ультразвуковой обработки Si–Au-системы за счет увеличения числа ионизированных центров и контактной разности потенциалов.

После ультразвуковой обработки при $f = 15$ МГц, $I^* = 2$ Вт/см² в течение $t = 30$ мин и $T = 290$ К значение V_k увеличилось с 0,1 В до 0,3 В. Соответственно, напряжённость поля E увеличилась в три раза ($E = 6 \cdot 10^6$ В/см). Учитывая квадратичную зависимость адгезионной прочности от поля ($P \sim E^2$), объясняется наблюдаемый резкий рост адгезионной прочности Au-пленки к Si-подложке (рис. 2).

Теоретическое значение P_0 до обработки ($4 \cdot 10^6$ Па) отличается от экспериментального ($\approx 7 \cdot 10^5$ Па) из-за окисного слоя на поверхности Si.

В работах [6] улучшение адгезионной прочности Cu и Ni к Si достигалось ультразвуком с интенсивностью $I^* \leq 0,5$ Вт/см² и временем воздействия $t = 30$ –200 мин, при этом максимальное увеличение прочности не превышало 10–35 %. В нашем случае $I^* = 2$ Вт/см², а время обработки в 6–7 раз меньше. Адгезионная прочность возросла более чем в



Symposium on Natural and Applied Sciences

Hosted Online from London, United Kingdom

Date: 5th April, 2026

Website: <https://econferencia.com>

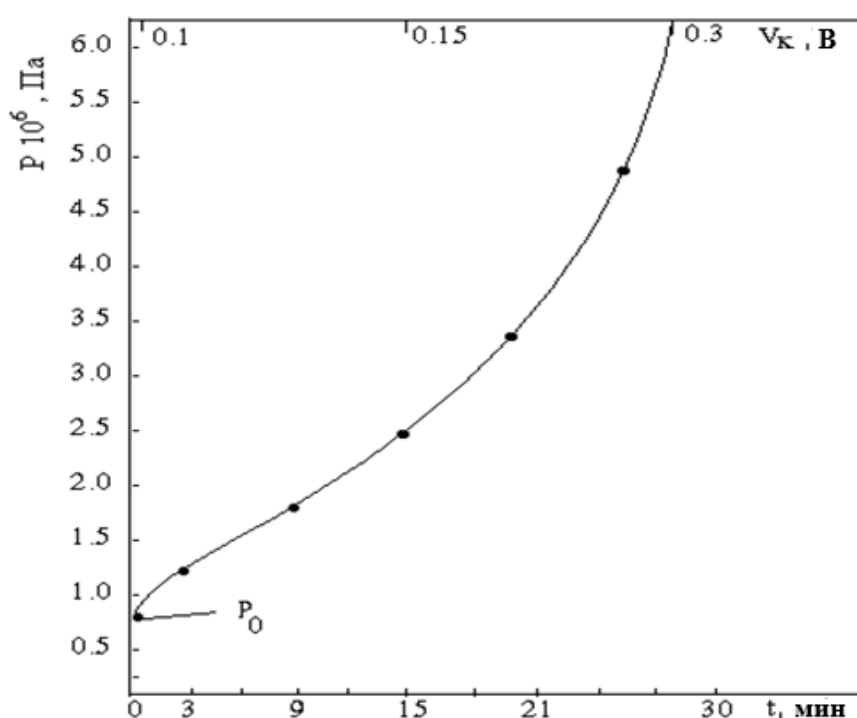


Рис. 2. Зависимость адгезионной прочности системы Si-Au-пленка от времени ультразвуковой обработки при $T=300\text{K}$. Мощность ультразвуковых волн $I^*=2\text{ Вт/см}^2$, частота $f = 15\text{МГц}$. P_0 – адгезионная прочность системы Si-Au-пленка до ультразвуковой обработки.

10 раз, что объясняется увеличением концентрации ионизированных центров под влиянием ультразвука (Рис.2). Наблюдаемый нами эффект акустостимулированного улучшения адгезионной прочности системы металл-полупроводник происходит в основном за счет увеличения концентрации ионизированных примесей под влиянием ультразвука, то есть рост адгезии определяется числом ионизированных примесных центров ультразвуком и контактной разностью потенциалов.



Symposium on Natural and Applied Sciences

Hosted Online from London, United Kingdom

Date: 5th April, 2026

Website: <https://econferencia.com>

1. Zhang, Y., Liu, H., & Chen, X. “Adhesion behavior of Au thin films on Si substrates under mechanical loading.” *Applied Surface Science*, 2024, 654, 159356. — (общая адгезия Au–Si).
2. Morales, J., Park, J.-H., & Oh, S. “Interface evolution and adhesion enhancement of Au/Si systems using plasma and ultrasonic treatments.” *Surface and Coatings Technology*, 2023, 481, 129163. — (ультразвук + плазма для улучшения адгезии).
3. Lee, D. H., & Kim, S. “Effects of ultrasonic excitation on the interfacial strength of metal–semiconductor thin films.” *Ultrasonics*, 2023, 137, 107431. — (специально про ультразвук и адгезию).
4. Kuznetsov, P., Ivanov, V., & Stepanov, A. “Mechanical delamination testing of noble-metal thin films deposited on silicon wafers.” *Materials & Design*, 2022, 223, 111197. — (методы отрыва / delamination).
5. Sato, T., & Nakamura, Y. “Gold–silicon interfacial reactions and adhesion behavior in microelectronic structures.” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, 33, 4152–4161. — (интерфейсная химия и адгезия).
6. Каримов А.В., Муминов Р.А., Заверюхин Б.Н., Исмаилов Х.Х. «Акустостимулированная адгезия пленок никеля к кремнию» //Поверхность, 2000, №10, с. 92-94.