

Итак, в статье рассмотрено влияние импульсов высокого напряжения короткой длительности на диэлектрические среды. Рассмотрен процесс развития высокоэнергетических электронов в газах, их роль в пробое твердых диэлектриков. Показана несостоятельность образования “убегающих” электронов в жидких диэлектриках.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вершинин Ю.Н.* Механизм электронного пробоя твердых диэлектриков // Изв. РАН. Энергетика. 2003. № 2. С. 152–157.
2. *Ткачев А.М., Яковленко С.И.* Коэффициент Таунсенда и характеристики убегания электронов в азоте // Письма в ЖТФ. 2004. 30(7), 14.
3. *Костыря И.Д., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.М., Яковленко С.И.* Роль быстрых электронов в формировании объемного импульсного разряда при повышенных давлениях // Письма в ЖТФ. 2004. 30(10), 31.
4. *Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А.* Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах при больших перенапряжениях, развивающийся в режиме убегания электронов // УФН. 1990. 160(7), 49.
5. *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков. М., 1958.
6. *Lipary N.O., Kunz A.V.* Energy Bands and Optical Properties of NaCl // Phys. Rev. 1971. V. 3. P. 471–497.
7. *Вершинин Ю.Н., Зотов Ю.А.* Перегревная неустойчивость в кристаллических изоляторах в предпробивном электрическом поле // ФТТ. 1975. Т. 17. Вып. 3. С. 826–834.
8. *Овчинников И.Т., Янишин К.В., Янишин Э.В.* Исследование распределения предпробивных электрических полей в воде с помощью эффекта Керра // ЖТФ. 1974. Т. XL4. С. 472–474.

Поступила 13.05.05

Summary

The present article is dedicated on researches of nanosecond impulse discharges influence on different dielectrics. Is considered the nanosecond impulse development in solid gases, non-local criterion of electrons run off in discharge gap, compared with inverse coefficient of Townsend. Is shown the strong electrical fields influence on the properties of solid and liquid dielectrics.

А.Г. Гаибов, К.И. Вахобов

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ ЗОЛОТЫХ ПОКРЫТИЙ К КРЕМНИЮ

*Ташкентский государственный технический университет,
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Республика Узбекистан*

Введение

Металлические пленки, которые покрывают полупроводники, служат электрическими контактами. Качество контакта во многом определяет и влияет на функциональные характеристики полупроводниковых приборов. Поэтому исследованиям прочностных и электрических свойств металлических контактов к полупроводникам уделяют значительное внимание. Обычно контакты металла и полупроводника формируют методами плавления или диффузии. Следует указать, что оба этих технологических процесса производятся при высоких температурах, что неизбежно ведет к возникновению термодефектов, ухудшающих как параметры самого полупроводника, так и приборов на его основе. Поэтому в последнее время ищутся новые методы создания металлических контактов к полупроводникам при комнатных температурах $T = 300$ К. Одним из таких методов является способ улучшения адгезионной прочности металлических пленок меди Cu и никеля Ni к кремнию ультра-

звук. Только в нескольких работах проведены исследования в этом направлении [1–3]. Причем увеличение адгезионной прочности этих контактирующих пар Si-Cu и Si-Ni достигалось под воздействием ультразвука при температурах в области контакта металл–полупроводник, не превышающих величину $T \leq 300$ К.

Золото в отличие от Cu и Ni имеет особое практическое значение как примесь, с помощью которой можно получать полупроводниковый материал с заданным временем жизни τ , удельным сопротивлением, так и материал, используемый для электрических контактов. В частности, золото используется как фронтальный контакт на "входном" окне Si-фотоприемника и одновременно служит защитой для окна от агрессивного влияния внешней среды. Исходя из вышесказанного можно заключить, что проблема создания высококачественных Au-контактов к кремнию при $T \approx 300$ К является актуальной. Целью настоящих экспериментов являлось исследование влияния воздействия ультразвуковых волн на адгезионную прочность пленок Au к кремнию n -типа с удельным сопротивлением $\rho \approx 100$ – 200 Ом·см и временем жизни носителей $\tau \approx 500$ – 600 мкс при температуре $T = 300$ К.

Методика эксперимента

Как известно, под термином "адгезионная прочность" понимается сила адгезионного взаимодействия, которая определяется путем отрыва пленок и численно равна силе внешнего воздействия, которое нарушающего адгезионную связь между субстратом и пленкой. Нами изучалась адгезионная прочность Au-пленок к кремнию до и после ультразвуковой обработки. На Si-пластины (диаметром $d = 28$ мм и толщиной $Y \leq 1$ мм) после механической и химической обработки методом напыления Au в вакууме формировались пленки. Термоотжиг структуры Si-Au не производился, толщина l Au-пленок определялась эллипсометрическим методом и составляла 1,5–3,0 мкм. Адгезионная прочность P_0 и P соответственно до и после облучения ультразвуковыми волнами с частотой $f = 0,8$ – 15 МГц и интенсивностью (мощностью) $I^* = 0$ – 10 Вт/см² изучалась методом нормального отрыва [4]. Данный метод является основным среди тех, с помощью которых производят отрыв пленки под действием внешней силы. При этом сила отрыва направлена перпендикулярно к площади контакта адгезив (Au-пленка)-субстрат (Si-подложка).

Для определения адгезионной прочности P пользуются следующей формулой [4]:

$$P = F_{\text{отр}}/\pi r^2,$$

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.

Результаты и их обсуждение

Теоретические расчеты для величины адгезионной прочности, проделанные в работе [4] для системы металл-полупроводник, показывают, что в отличие от других систем на величину адгезии сильное влияние оказывает контактная разность потенциалов, которая, как известно, зависит от числа ионизированных центров и напряженности электрического поля E между контактирующими поверхностями. Следует ожидать, что под действием ультразвука происходит не только диффузия Au-атомов в Si-подложку, но и изменение концентрации ионизированных центров N и соответственно E -поля. Контактная разность потенциалов при адгезии металла и полупроводника равна [4]:

$$V_k = [2S_0(\kappa kT\varepsilon/q)\text{sh}(\phi/2) + \pi q \text{sh}\phi] + kT/q,$$

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

Оценки показывают, что напряженность электрического поля E для контактной разности потенциалов $V_k \approx 0,1$ В, $C \approx 10^{13}$ 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 $\varepsilon \approx 10$ имеет величину $E \approx 2 \cdot 10^6$ В/см.

Для значений $V_k \approx 0,3$ В напряженность электрического поля E возрастает до величины $E \approx 6 \cdot 10^6$ В/см.

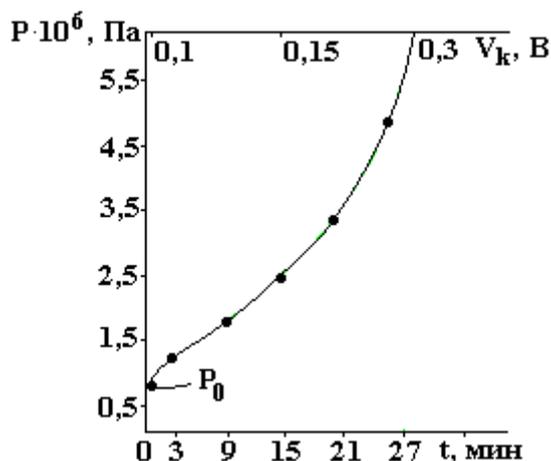
В этих условиях адгезионная прочность P_0 определяется по формуле, представленной в работе [4]:

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

где N_d – концентрация донорных примесей; m^* – эффективная масса электрона; ΔE – энергетический зазор уровнем примесей и зоной проводимости. Таким образом, имеется дополнительный физиче-

ский механизм помимо акустостимулированной диффузии, который существенно увеличивает P_0 после ультразвуковой обработки системы Si–металлическая пленка. С ростом контактной разности потенциалов V_k и числа ионизированных центров растет напряженность поля E между Si-подложкой и металлом. Этот эффект обуславливает увеличение адгезионного взаимодействия за счет электрических сил. Теоретические оценки показывают [4], что при напряженностях электрических полей $E \approx 10^7$ В/см адгезионная прочность $P_0 \approx 4 \cdot 10^6$ Па ($1 \text{ дин/см}^2 = 10^{-1}$ Па).

Исследования электрофизических характеристик показали, что наблюдается общая закономерность для всех образцов после облучения ультразвуком – рост контактной разности потенциалов V_k . Следует отметить, что Si–Au-образцов после ультразвуковой обработки по-разному наблюдается рост величины V_k . Общей закономерности роста V_k от величины удельного сопротивления Si-подложки детально выявить пока не удалось, так как полупроводник всегда имеет на поверхности тонкую диэлектрическую окисную пленку, оказывающую влияние на V_k и соответственно на величину E и адгезионную прочность.



Зависимость адгезионной прочности системы Si–Au-пленка от времени ультразвуковой обработки при $T=290$ К. Мощность ультразвуковых волн $I^=2$ Вт/см², частота $f=15$ МГц. P_0 – адгезионная прочность системы Si–Au-пленка до ультразвуковой обработки*

Произведен расчет величины E для Si–Au-образца № 25, имевшего до ультразвуковой обработки значение $V_k = 0,1$ В. После ультразвуковой обработки при $f = 15$ МГц и $I^* = 2$ Вт/см² в течение времени $t = 30$ мин и при температуре $T = 290$ К значение V_k увеличилось с 0,1 до 0,3 В. Таким образом, можно считать, что после ультразвукового воздействия напряженность поля E между Au-пленкой и Si-подложкой возросла в три раза и стала равной $6 \cdot 10^6$ В/см. Таким образом с учетом квадратичной зависимости адгезионной прочности P от поля ($P \sim E^2$) можно объяснить наблюдаемый резкий рост адгезионной прочности Au-пленки к Si-подложке (см. рисунок). Как видно из рисунка, теоретическое значение адгезионной прочности до ультразвуковой обработки, равное $4 \cdot 10^6$ Па, отличается от экспериментального значения $P_0 \approx 7 \cdot 10^5$ Па, что объясняется существованием окисного слоя на поверхности Si-подложки, который и снижает величину адгезионной прочности, наблюдаемой в реальном случае. При увеличении времени ультразвукового воздействия экспериментальное поведение зависимости $P(t)$ удовлетворительно совпадает с теоретическими расчетами и происходит ее нелинейный рост согласно функциональной зависимости $P \sim E^2$.

Заключение

В заключение отметим, что в работах [1, 2] наблюдаемое улучшение адгезионной прочности металлических пленок Cu и Ni к Si-подложкам достигалось путем применения ультразвуковых волн интенсивностью $I^* \leq 0,5$ Вт/см² при значительных временах ультразвукового воздействия $t = 30$ – 200 мин. При этом происходила диффузия металла на значительную глубину в полупроводник и максимальное увеличение адгезионной прочности не превышало 10–35% от первоначального (до ультразвуковой обработки) значения. В нашем случае интенсивность ультра-

звуковых волн была в четыре раза больше) ($I^* = 2 \text{ Вт/см}^2$) и время t ультразвуковой обработки – в 6–7 раз меньше. Как видно из представленных результатов (см. рисунок), адгезионная прочность возросла более чем в 60 раз. Анализ показал, что при таких режимах ($t \leq 30$ мин) ультразвуковой обработки атомы золота не проникают глубоко в Si-подложку ($\leq 0,1$ мкм) и, следовательно, не могут образовывать в чувствительном элементе Si-приемника центров захвата, уменьшающих время жизни неосновных носителей заряда. 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заверюхин Б.Н., Исмаилов Х.Х., Муминов Р.А., Джулиев Х.Х. Акустостимулированная адгезия медных пленок к кремнию // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып.15. С.25–27.
2. Турсункулов О.М. Исследование акустостимулированных изменений контактных, приповерхностных и объемных свойств полупроводниковых структур на основе Si и GaAs. Автореф. канд. дис. Ташкент, 2003.
3. Гаибов А.Г., Заверюхин Б.Н., Заверюхина Н.Н., Муминов Р.А. Акустостимулированная адгезия пленок Al к Si // Материалы конф. “Фундаментальные и прикладные вопросы физики”, посвящ. 60-лет. АН и ФТИ АН РУз, 27-28 ноября, 2003. Ташкент, С. 62–64.
4. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М., 1973.

Поступила 15.04.05

Summary

Influence of ultrasonic waves on adhesive strength of the Au-films to silicon of a n -type with specific resistivity $\rho \approx 100\text{--}200 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ and time of life of carriers $\tau \approx 500\text{--}600 \text{ }\mu\text{s}$ has been examined at temperature $T = 300 \text{ K}$. It is shown, that the effect of acoustically stimulated of improvement of the adhesive of durability of metal – semiconductor layer occurs basically at the expense of an increase of concentration ionized impurities under in samples exposed to ultrasound.
