УДК 621.382.2

ФЛУКТУАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЛУПРОВОДНИКА В СТРУКТУРЕ Si – SiO2 ПРИ ОБЛУЧЕНИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ОТЖИГЕ

А.А. СААКЯН

Ереванский физический институт им. А.И. Алиханяна

(Поступила в редакцию 7 мая 2007 г.)

Измерением параметров поверхностных состояний исследованы флуктуации поверхностного потенциала полупроводника в структуре Si–SiO₂, вызванные облучением частицами высокой энергии (электроны с энергией 50 МэВ и ионы мышьяка с энергией 40 кэВ) и последующим отжигом. Установлено, что после облучения флуктуация поверхностного потенциала слабо уменьшается от 0,049 В до 0,044 В, а после отжига наблюдается ее значительное увеличение. При этом в образцах, облученных ионами мышьяка, увеличение флуктуации значительно больше (0,096 В), чем в образцах, облученных электронами (0,06 В).

1. Введение

Радиационные эффекты на границе раздела диэлектрик–полупроводник (Д–П) в структуре Si–SiO₂ продолжают находиться в центре внимания исследователей [1-5]. Это связано, с одной стороны, с широким применением электронных приборов и устройств, работающих в условиях воздействия ионизирующего излучения, и с другой стороны, с применением радиационной технологии при производстве электронной техники [3,5]. Под воздействием ионизирующей радиации в структуре Si–SiO₂ наблюдаются, в основном, два процесса: генерация поверхностных состояний (ПС) на поверхности раздела полупроводника с диэлектриком и накопление положительного заряда в диэлектрике [1-3,6]. Заряды, локализованные в области границы раздела Д–П в структуре Si–SiO₂, можно разделить на три типа: заряды, захваченные ПС, фиксированные заряды, накопленные в диэлектрике, и заряды ионизированных доноров или акцепторов [1,6,7]. Предполагается, что все заряды по поверхности полупроводника распределены случайным образом, и, следовательно, электрическое поле этих зарядов также будет распределено неравномерно по поверхности полупроводника в плоскости границы раздела Д–П [6,7].

Работ, посвященных исследованиям флуктуации поверхностного потенциала полупроводника в структуре Si–SiO₂, не так много [4-8]. В работе [6] показано, что флуктуация поверхностного потенциала полупроводника на границе раздела Si–SiO₂ связана, скорее всего, с отрицательным зарядом на поверхностных состояниях, а не с флуктуациями фиксированного заряда в оксиде. В работе же [4] найдено, что γ-облучение структуры Si–SiO₂

приводит к заметному увеличению флуктуации. Однако, как будет показано ниже, в процессе облучения структуры Si–SiO₂ и последующего отжига эта картина будет другой, поскольку плотности заряда на ПС и фиксированного заряда в диэлектрике существенно изменятся [9].

Целью настоящей работы является исследование флуктуации поверхностного потенциала полупроводника на границе раздела Si–SiO₂ после облучения различными видами радиации и последующего отжига.

2. Техника эксперимента и теоретическая модель

Двуокись кремния толщиной 90–110 нм в структуре Al–SiO₂–Si выращивалась сухим окислением кремния *п*-типа с удельным сопротивлением 4,5 Ом см и кристаллической ориентацией поверхности полупроводника [100]. Металлический полевой электрод диаметром около 0,8 мм на SiO₂ наносился вакуумным напылением алюминия на холодную подложку. Тыловой контакт МОП-структуры был выполнен нанесением пасты Ga:Zn (1:4) на чистую поверхность кремния. Облучение образцов электронами с энергией 50 МэВ проводилось на линейном электронном ускорителе Ереванского синхротрона. Бомбардировка структуры Si–SiO₂ ионами мышьяка с энергией 40 кэВ проводилась на установке ИЛУ-3 со стороны оксида при комнатной температуре. В соответствии с видом облучения назовем эти образцы "е" и "As".

Параметры МОП-структуры измерялись по методу полной проводимости [7] с использованием двухмостовой установки [10]. Первый мост работал в диапазоне частот от 200 Гц до 1 МГц и служил для измерения импеданса МОП-структуры, а второй работал на частоте 2 МГц и был предназначен для измерения емкости МОП-структуры для установления определенных значений поверхностного потенциала полупроводника, используя данные решения уравнения Пуассона [11].

Флуктуация поверхностного потенциала полупроводника исследовалась с использованием теоретической модели Николлиана и Гетцбергера [7] для МОП-структуры. Согласно статистической модели этих авторов, параллельная проводимость G_P / ω МОП-структуры выражается через параметры ПС следующим образом:

$$\frac{G_P}{\omega} = N_{ss} \left(2\pi\sigma^2\right)^{-\frac{1}{2}} \frac{c_n n_0}{2\omega} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\exp\frac{-\left(u_s - \overline{u}_s\right)^2}{\sigma^2}\right] \exp\left(-u_s\right) \ln\left[1 + \frac{\omega^2}{\left(c_n n_0\right)^2} \exp 2u_s\right] du_s, \quad (1)$$

где ω – частота измерительного сигнала, N_{ss} – плотность ПС, σ – среднеквадратичное отклонение поверхностного потенциала, $c_n = \overline{v}\sigma_n$ – вероятность захвата электрона ПС, \overline{v} – средняя тепловая скорость электрона, σ_n – сечение захвата электрона, n_0 – равновесная концентрация носителей в объеме полупроводника, u_s и \overline{u}_s – поверхностный потенциал и его среднее значение в единицах $k_B T/q$, k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, q – заряд электрона. В рамках этой модели поверхностный потенциал полупроводника можно описать также характеристической площадью α . Это площадь, на которой поверхностный потенциал полупроводника имеет постоянную величину и которая вычисляется из выражения [7]

$$\sigma = \frac{W(\overline{u}_s)\beta}{\left[W(\overline{u}_s)C_0 + \varepsilon_{\rm Si}\right]} \left(\frac{q\overline{Q}}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (2)$$

где $W(\overline{u}_s)$ – толщина обедненного слоя, \overline{Q} – средняя плотность поверхностного заряда, C_0 – емкость оксидной пленки, $\beta = q/k_BT$. Параметры ПС, а также величина среднеквадратного отклонения σ определялись из экспериментальных данных зависимости G_p/ω от частоты ω по методу, описанному в [12].

В работах [6,7] показано, что флуктуация поверхностного потенциала главным образом связана со случайным распределением по поверхности полупроводника заряженных поверхностных центров и зарядов в диэлектрике. В приведенных ниже расчетах будут учтены вклады этих двух типов зарядов. Максимальная доза облучения образцов электронами была $D = 5 \times 10^{13}$ эл/см². При такой дозе влияние объемных радиационных дефектов на концентрацию объемного заряда незначительно [13] и можно применять модель [7]. Плотность заряда, локализованного на ПС, вычислялась из экспериментальных данных энергетической зависимости плотности ПС, лежащих в интервале от середины запрещенной зоны до энергии E_c – 0.35 эВ, который соответствует области истощения.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В табл.1 приведены некоторые параметры структуры Al–SiO₂–Si до облучения, после облучения и после отжига. Из приведенных данных видно, что после облучения обоими видами частиц скорость генерации ПС и, соответственно, захваченный заряд на этих центрах значительно больше скорости создания положительного заряда в диэлектрике. Такая картина характерна для МОП-структуры, поскольку граница раздела Д–П гораздо чувствительнее к радиационным воздействиям, чем диэлектрик [9,13–15].

Характеристическая площадь α , на которой поверхностный потенциал имеет постоянную величину, после облучения также значительно увеличивается. Это связано с тем, что облучение обоими видами радиации приводит к существенному увеличению плотности заряда на ПС и в диэлектрике, тогда как на среднеквадратичное отклонение σ облучение влияет незначительно, уменьшая его величину от 0,049 В до 0,044 В.

Табл.1. Параметры МОП-структуры до облучения, после облучения и после отжига. \overline{N}_{ss} [x10¹¹ см⁻ ²эВ⁻¹] – среднее значение плотности ПС в средней части запрещенной зоны Si, Q_{ss} [x10⁻⁸ Kл/см²] – плотность заряда на ПС, Q_0 [x10⁻⁸ Kл/см²] – плотность заряда в диэлектрике, α [x10⁻⁹ см²] – характеристическая площадь.

Вид облучения	До облучения				После облучения				После отжига			
	\overline{N}_{ss}	Q_{ss}	Q_0	α	\overline{N}_{ss}	Q_{ss}	Q_0	α	\overline{N}_{ss}	Q_{ss}	Q_0	α
"e"	1	0,34	5,9	1,1	38	12,7	26,6	8,6	1,2	0,4	6,0	0,45
"As+"	1,2	0,40	7,3	1,3	12	4,0	21,0	5,0	1,3	0,44	16,5	0,80

На рис.1 представлены кривые процесса отжига заряда на ПС на границе раздела SiO₂–Si и заряда в диэлектрике облученных МОП-структур. Как видно, величины плотности

заряда на ПС для обоих типов образцов уменьшаются с ростом температуры и приближаются к своим исходным значениям (см. также данные в табл.1). Однако для образцов "As⁺" это происходит при более высоких температурах отжига по сравнению с образцами "e". Отметим, что при отжиге изменения плотностей радиационно-индуцированного заряда в диэлектрике для обоих типов образцов существенно отличаются. Если для образцов "e" после отжига при температуре 220°С плотность *Q* уменьшается и восстанавливается бывшее до облучения состояние, то для образцов "As⁺" заряд в диэлектрике при этой температуре уменьшается частично. Это, по-видимому, связано со структурным различием радиационных дефектов, возникающих на границе раздела Д–П и в диэлектрике при электронном облучении и ионной бомбардировке [9].



Рис.1. Зависимость плотностей зарядов Q_s на ПС и Q_b в диэлектрике от температуры изохронного отжига образцов (10 мин), подвергнутых облучению электронами с энергией 50 МэВ ($D = 5 \times 10^{13}$ эл/см²) и ионами мышьяка с энергией 40 кэВ ($D = 10^{-6}$ Кл/см²).

Температурная зависимость среднеквадратичного отклонения σ поверхностного потенциала полупроводника при отжиге облученных образцов представлена на рис.2. Как видно, $\sigma(t)$ тоже значительно отличается для обоих типов образцов. По сравнению с исходным образцом, после отжига наблюдается существенное увеличение σ , т.е. отжиг облученных образцов приводит в значительному увеличению флуктуации поверхностного потенциала полупроводника. Однако в случае образцов "Аs⁺" увеличение σ значительно больше по сравнению с образцами "e". Поскольку при отжиге образцов "As⁺" плотность ПС уменьшается до исходного значения и радиационно-индуцированный заряд в диэлектрике уменьшается приблизительно на 15%, то можно предположить, что наблюдаемое значительное увеличение флуктуации поверхностного потенциала полупроводника в этом случае вызвано перераспределением заряда в оксиде кремния. Это явление в образцах, об-

лученных электронами, проявляется значительно слабее.



Рис.2. Температурная зависимость среднеквадратичного отклонения поверхностного потенциала полупроводника - при отжиге облученных МОП-структур. Указанная при $t = 0^{\circ}$ С величина - соответствует необлученному образцу.

Необходимо отметить, что при ионной бомбардировке ионы сами не достигают границы раздела Д–П, так как среднее значение длины проективного пробега ионов мышьяка в окисле кремния около 24 нм, что значительно меньше толщины окисла 90 нм. Тем не менее, в этом случае создаются радиационные поверхностные центры на границе раздела Д–П, и, судя по влиянию процесса отжига на исследованные в работе параметры, можно сказать, что короткопробежные ионы мышьяка в структуре Si–SiO₂ создают радиационные дефекты другой природы. Тот факт, что в этом случае процесс отжига ПС происходит при более высоких температурах, чем при электронном облучении, говорит о том, что дефекты, созданные при ионной бомбардировке имеют более сложную природу и являются продуктами более сильных нарушений границы раздела Д–П структуры SiO₂–Si, чем дефекты, созданные электронным облучением.

Из сравнения плотности ПС, плотностей заряда в диэлектрике и величин флуктуаций поверхностного потенциала полупроводника до облучения и после отжига видно, что (см. табл.1) а) плотность ПС для обоих видов облучения остается почти без изменения; б) плотность заряда в диэлектрике образцов "е" тоже остается без заметного изменения, однако в случае образцов "As⁺" она увеличивается более чем в два раза; в) величины флуктуации поверхностного потенциала полупроводника в обоих случаях значительно увеличиваются.

Эти результаты, в отличие от результатов работы [6], позволяют предположить, что наблюдаемое увеличение флуктуации поверхностного потенциала полупроводника после отжига главным образом вызвано структурными изменениями радиационных дефектов при отжиге МОП-структуры, в результате которого происходит перераспределение заряда в диэлектрике.

4. Заключение

Установлено, что облучение структуры Si–SiO₂ электронами с энергией 50 МэВ и ионами мышьяка с энергией 40 кэВ приводит к небольшому уменьшению флуктуации поверхностного потенциала полупроводника от 0,049 В до 0,044 В и существенному увеличению характеристической площади. Обнаружено, что отжиг образцов, облученных обоими видами радиации, приводит к значительному увеличению флуктуации поверхностного потенциала полупроводника и к сильному уменьшению характеристической площади. При этом в образцах, облученных ионами мышьяка, увеличение флуктуации значительно больше (0,096 В), чем в образцах, облученных электронами (0,06 В), а характеристические площади обоих типов образцов становятся значительно меньше по сравнению с необлученными образцами.

Предполагается, что увеличение флуктуации после отжига в образцах, облученных короткопробежными ионами мышьяка, связано с перераспределением радиационноиндуцированного заряда в оксиде. При отжиге образцов, облученных электронами, это явление проявляется слабо.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. J.P.Mitchell, D.K.Wilson. Bell System Tech. J., XLVI, 1 (1967).
- 2. Е.Х.Сноу, А.С.Гроуф, Д.Ж.Фитцжеральд. ТИИЭР, **55**, №7, 53 (1967).
- 3. В.М.Кулаков, Е.А.Ладыгин. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М., Советское радио, 1980.
- 4. А.П.Горбань, В.Г.Литовченко, Д.Н.Москаль. УФЖ, **20**, 2012 (1975).
- 5. В.А.Козлов, В.В.Козловский. ФТП, **35**, 769 (2001).
- 6. И.В.Антонова, В.А.Стучинский и др. ФТП, **37**, 1341 (2003).
- 7. E.H.Nikollian, A.Goetzberger. Bell System Tech. J., XLVI, 1055 (1967).
- 8. А.Г.Ждан, Н.Ф.Кухарская, Г.В.Чучева. ФТП, **37**, 686 (2003).
- 9. G.N.Eritsyan, V.N.Mordkovich, A.S.Oganessyan, A.A.Sahakyan. Crystal Lattice Defects and Amorphous Materials, 14, 256 (1987).
- 10. Г.Н.Ерицян, А.С.Оганесян, А.А.Саакян. Препринт ЕрФИ-447(54)-80, Ереван, 1980.
- 11. С.М.Зи. Физика полупроводниковых приборов. М., Энергия, 1973.
- 12. J.J.Simonne. Solid-State Electronics, 16, 121 (1973).
- 13. Г.Н.Ерицян, Р.А.Мелконян, А.А.Саакян и др. В сб. "Радиационные дефекты в полупроводниках". Минск, изд. БГУ, 1972, с.52.
- 14. P.S.Winokur, L.M.McGarrity, H.E.Boesch. IEEE Trans. Nucl. Sc., NS-23, 1580 (1976).
- 15. **Э.Н.Вологдин, Г.А.Жукова, В.Н.Мордкович**. ФТП, **7**, 835 (1978).

ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ՊՈՏԵՆՑԻԱԼԻ ՖԼՈՒԿՏՈՒԱՑԻԱՆ Si–SiO₂ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ ՃԱՌԱԳԱՅԹԱՀԱՐՈՒՄԻՑ ԵՎ ԹՐԾՈՒՄԻՑ ՀԵՏՈ

Ա.Ա. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

Մակերևութային մակարդակների պարամետրերի չափման մեթոդով SiO₂-Si կառուցվածքներում ուսունասիրված է կիսահաղորդչի մակերևութային պոտենցիալի ֆլուկտուացիան տարբեր տեսակի բարձր էներգիայով օժտված մասնիկներով ձառագայթահարումից (50 ՄէՎ էներգիայով էլեկտրոններ և 40 կէՎ էներգիայով արսենի իոններ) և թրծումից հետո։ Հաստատված է, որ ձառագայթահարումից հետո կիսահաղորդչի մակերևութային պոտենցիալի ֆլուկտուացիան թույլ նվազում է 0.049 Վ-ից մինչև 0.044 Վ, իսկ թրծումից հետո դիտվում է դրա նշանակալի աձ։ Ընդ որում արսենի իոններով ձառագայթահարված նմուշներում ֆլուկտուացիայի աձը զգալի մեծ է (0.096 Վ) քան էլեկտրոններով ձառագայթահարված նմուշներում (0.06 Վ)։

FLUCTUATION OF THE SEMICONDUCTOR SURFACE POTENTIAL IN Si–SiO₂ STRUCTURE AFTER IRRADIATION AND SUBSEQUENT ANNEALING

A.A. SAHAKYAN

Fluctuations of the semiconductor surface potential in a Si–SiO₂ structure induced by irradiations with various high-energy particles (electrons with the 50 MeV energy and arsenic ions with the 40 keV energy) and by the subsequent annealing are investigated by measurements of semiconductor interface state parameters. It is established that the fluctuation of the semiconductor surface potential after irradiation weakly decreases from 0.049 V to 0.044 V and a noticeable increase is observed after annealing. For the samples irradiated by arsenic ions the increase in the fluctuation is much more (0.096 V) than that for the electron-irradiated samples (0.06 V).