

УДК 621.315.592

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДИФФУЗИОННЫХ КРЕМНИЕВЫХ $p$ - $n$ -СТРУКТУР

А. М. Мусаев, Ш. Р. Муталибов

Институт физики ДНЦ РАН

Исследовано влияние температурного режима электронного облучения с энергией 4 МэВ на основные электрофизические характеристики диффузионных кремниевых  $p^+n$ -структур. Показано, что температура структур при электронном облучении играет существенную роль в определении их характеристик. Полученные результаты могут быть использованы для увеличения быстродействия кремниевых  $p$ - $n$ -структур, а также для оптимизации и стабилизации их параметров.

Influence of temperature regime of the electron irradiation with 4 MeV on basic electrical characteristics of the diffused silicon  $p^+n$ -structures is studied. It is shown that the structures' temperature at electron irradiation plays an important role in determination of their characteristics. The obtained results can help increase the operating speed of the silicon  $p$ - $n$ -structures as well as optimize and stabilize their parameters.

Ключевые слова:  $p$ - $n$ -структуры; кремний; электронное облучение; прямое напряжение; обратный ток; барьерная емкость; температура; радиационные дефекты.

Keywords:  $p$ - $n$ -structures; silicon; electron irradiation; direct voltage drop; inverse current; barrier capacitance; temperature; radiation defect.

### 1. Введение

Введение в активные области приборов радиационных центров (РЦ), дающих глубокие уровни, позволяет повысить быстродействие  $p$ - $n$ -структур, но одновременно это приводит к некоторому ухудшению других параметров структур, т.е. к увеличению статического прямого падения напряжения и к увеличению обратного тока.

Как известно, облучение приводит к образованию в кристалле кремния всего набора РЦ. Эффективность образования РЦ в кремнии зависит от содержания в кристалле не только легирующих, но и фоновых примесей, в первую очередь кислорода, который входит в состав РЦ как вакансионных, так и межузельных: ( $C_i - C_s$ ) – межузельный углерод – узловый углерод и ( $C_x - O_y$ ) типов, где ( $x, y = 1, 2, 3$ ) – межузельный углерод – межузельный кислород. К вакансионным относятся  $-A$ ,  $-E$ -центры, вносящие в запрещенную зону уровни  $E_c - 0.18$  эВ и  $E_c - 0.42$  эВ соответственно. К межузельным относятся комплексы, вносящие в запрещенную зону уровни  $E_c - 0.16$  эВ,  $E_v - 0.1$  эВ и  $E_v - 0.35$  эВ.

Существенным фактором, определяющим параметры глубоких РЦ в запрещенной зоне кремния, являются температура  $p$ - $n$ -структур в процессе облучения и величина интегрального потока электронов [1–3]. Температура структур при облучении определяет концентрационное соотношение образованных при облучении разных глубоких радиационных центров. Данный фактор также может привести к смене типа рекомбинационного центра, доминирующего в структуре [4–5]. Температура структур оказывает существенное влияние на совокупность всех электрофизических параметров  $p$ - $n$ -структур.

В данной работе исследовано влияние температуры и величины интегрального потока электронов на изменение основных электрофизических параметров диффузионных кремниевых  $p$ - $n$ -структур.

### 2. Эксперимент

Исследования проводились на диффузионных  $p^+n$ -структурах, изготовленных на базе

*n*-Si с  $\rho = 40 \text{ Ом/см}$ . Структуры изготавливались по диффузионной технологии с применением в качестве диффузантов бора и фосфора. Глубина залегания *p-n*-перехода структур составляла  $\sim 125 \text{ мкм}$ , толщина структуры  $\sim 250 \text{ мкм}$ , площадь  $1.4 \times 1.4 \text{ мм}^2$ . Отбор образцов для облучения производился по одинаковым характеристикам *p-n*-структур, которые усреднялись по результатам измерения 10 образцов. Облучение проводилось на линейном импульсном ускорителе электронов при температурах образцов  $20^\circ\text{C}$  и  $250^\circ\text{C}$ . Энергия облучающих электронов составляла  $4 \text{ МэВ}$ . Интегральный поток электронов варьировался от  $0.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  до  $1.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . После облучения структуры подвергались изотермическому отжигу при  $300^\circ\text{C}$  в течение 0.5 часа, а потом при  $200^\circ\text{C}$  в течение 10 часов. Измерение параметров *p-n*-структур проводились до и после облучения.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1(a, b) приведены зависимости  $U_\Phi/U_0(\Phi)$  изменения относительного падения прямого напряжения на *p-n*-структурах при различных значениях прямых токов в зависимости от интегрального потока электронов, облученных при температурах  $20^\circ\text{C}$  и  $250^\circ\text{C}$ , где  $U_0$ ,  $U_\Phi$  – величины прямого напряжения на структуре до и после облучения.

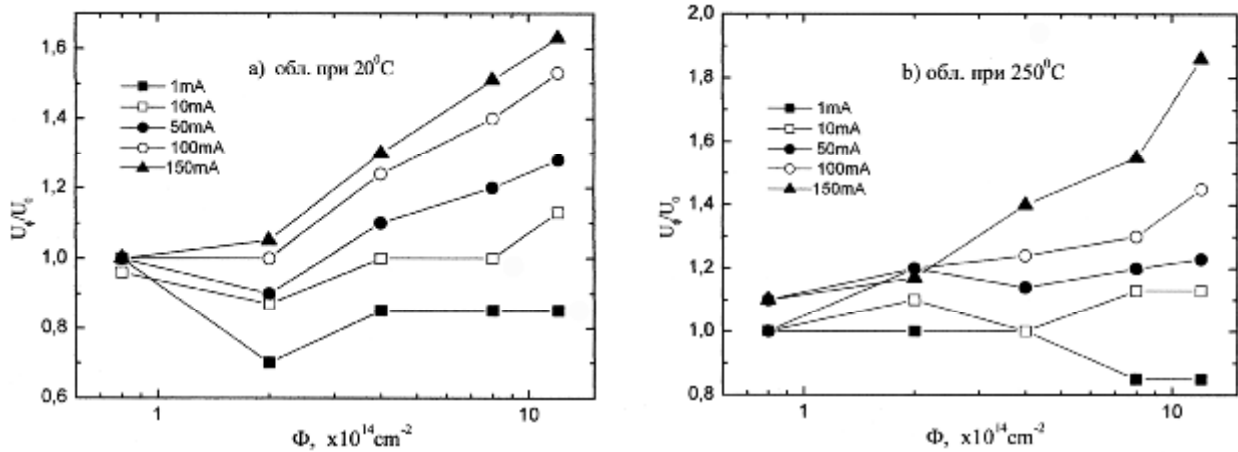
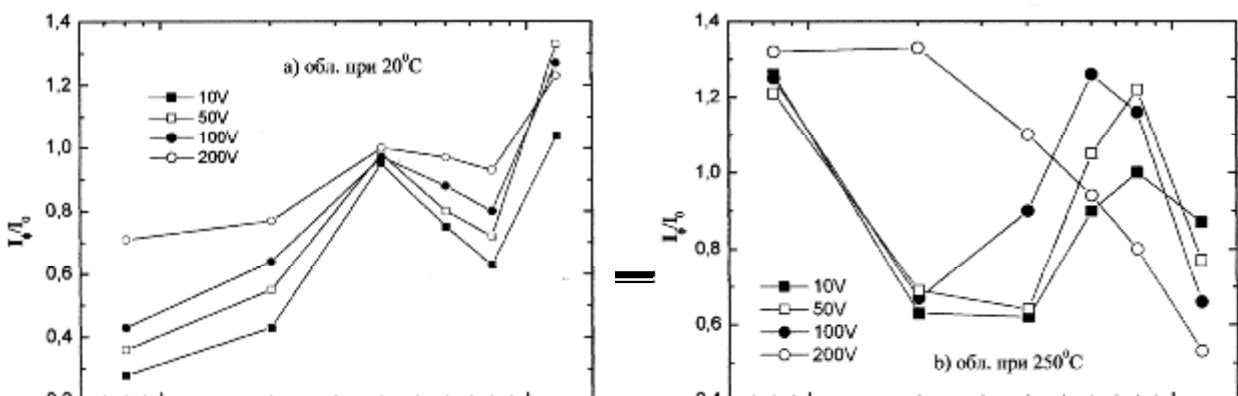
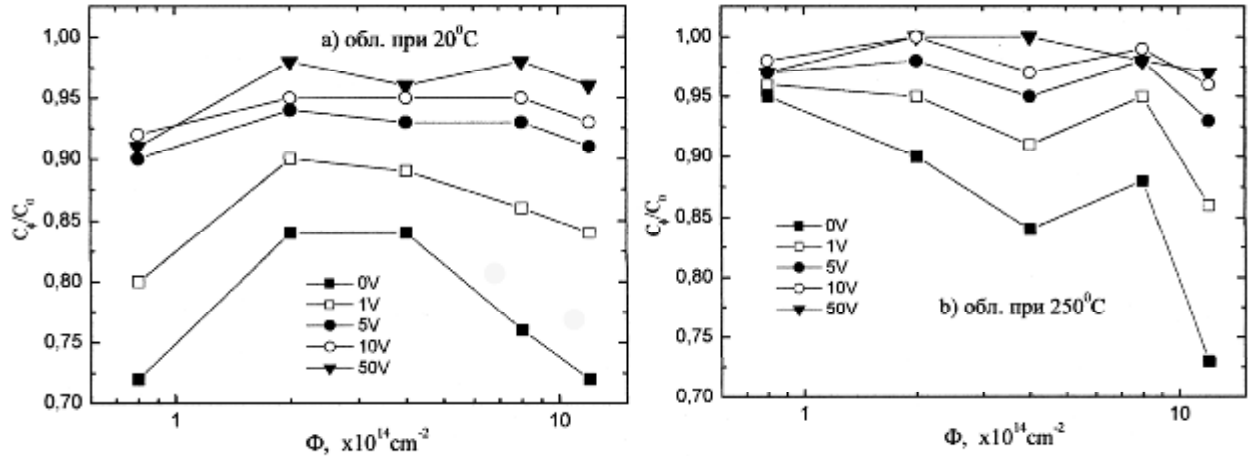


Рис. 1(a, b). Зависимость изменения относительного падения прямого напряжения на *p-n*-структурах  $-U_\Phi/U_0(\Phi)$  ( $U_0$ ,  $U_\Phi$  – прямые напряжения до и после облучения) при значениях прямых токов  $I_{пр.} = 1, 10, 50, 100, 150 \text{ мА}$  в зависимости от интегрального потока электронов, облученных при температурах

Из результатов эксперимента следует, что облучение при  $20^\circ\text{C}$  при малых уровнях инжекции приводит к уменьшению прямого падения напряжения. Облучение при температуре структур  $250^\circ\text{C}$  приводит к уменьшению прямого падения напряжения еще при более низких уровнях инжекции и при более высоких значениях интегрального потока электронов, когда  $\Phi > 2.0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Наблюдаемые различия изменения прямого падения напряжения являются следствием того, что вольтамперные характеристики *p-n*-структур в зависимости от уровня инжекции определяются процессами, обусловленными изменениями скорости объемной рекомбинации неосновных носителей заряда в различных участках базовой области структуры.



**Рис. 2(a, b).** Зависимость изменения относительного значения обратного тока  $I_{\Phi}/I_0(\Phi)$ , ( $I_0$ ,  $I_{\Phi}$  – величина обратного тока до и после облучения) структур от интегрального потока электронов, облученных электронами при



**Рис. 3(a, b).** Зависимость изменения относительного значения барьерных емкостей облученных структур к необлученным  $C_{\Phi}/C_0(\Phi)$  от интегрального потока электронов для приложенных обратных напряжений  $U_{обр.} = 0, 1, 5, 10, 50$  V, облученных при а)  $20^{\circ}\text{C}$  и б)  $250^{\circ}\text{C}$

На рис. 2(a) приведены зависимости изменения относительного значения обратного тока  $I_{\Phi}/I_0(\Phi)$ , ( $I_0$ ,  $I_{\Phi}$  – величина обратного тока до и после облучения) структур от интегрального потока электронов, облученных электронами при  $20^{\circ}\text{C}$ , при приложенных обратных напряжениях равных  $U_{обр.} = 10, 50, 100, 200$  V. На рис. 2(b) приведены зависимости изменения относительного значения обратного тока  $I_{\Phi}/I_0(\Phi)$  структур от интегрального потока электронов, облученных электронами при  $250^{\circ}\text{C}$ .

Из результатов эксперимента (рис. 2(a)) видно, что в диапазоне увеличения дозы облучения изменение обратного тока проходит через локальные экстремумы. Аномальную зависимость обратного тока от интегрального потока электронов имеют и структуры, облученные при  $250^{\circ}\text{C}$ , которые показаны на рис. 2(b). Экстремумы обратного тока структур, облученных электронами при  $20^{\circ}\text{C}$  и  $250^{\circ}\text{C}$ , имеют смещение по величине интегрального потока электронов.

Для необлученных кремниевых  $p$ - $n$ -структур характерным является преобладание тока термогенерации над остальными компонентами обратного тока. Электронное облучение структур приводит к неоднозначному изменению обратного тока, что обусловлено увеличением или уменьшением скорости генерации носителей в основном в области пространственного заряда, определяемого концентрацией глубоких уровней. Уменьшения обратных токов при данных дозах облучения обусловлены тем, что на данных этапах облучения диффузионные потоки создаваемых облучением вакансий и междоузельных атомов направлены к дефектам кристаллической решетки. Дефекты, создающие вокруг себя напряжения сжатия, служат стоками для вакансий (геттеры), а напряжения растяжения – стоками для междоузельных атомов кремния [6]. Указанные процессы приводят к нейтрализации электрически активных примесей, в результате чего обратные токи структур уменьшаются. Как видно, при некоторых дозах облучения (определенных для

разных температур облучения) происходит упорядочение кристаллической решетки *p-n*-структур, которое приводит к уменьшению генерационных обратных токов. Возможной причиной является и образование в области пространственного заряда комплексов  $-PV_2^-$  вследствие перехода  $-E$ -центров с отрицательным зарядом в нейтральное зарядовое состояние. При дальнейшем увеличении интенсивности облучения в области объемного заряда *p-n*-структур происходит накопление рекомбинационных центров, которое приводит к существенному увеличению обратных генерационных токов.

С целью выявления механизмов возбуждения обратных токов *p-n*-структур был проведен анализ результатов измерений обратных токов от приложенных напряжений в диапазоне температур  $0 \pm 100^\circ\text{C}$ . Эти результаты для структур, облученных при  $20^\circ\text{C}$ , хорошо согласуются с термогенерационной природой обратного тока, обусловленной одним глубоким уровнем.

Анализ результатов измерений обратных токов *p-n*-структур, облученных при  $250^\circ\text{C}$ , указывает на более сложную зависимость термогенерационного тока, который связан с двумя, возможно, и более генерационными уровнями.

На рис. 3(a, b) приведены зависимости  $C_\Phi/C_0(\Phi)$  изменений относительных величин барьерных емкостей облученных структур к необлученным от интегрального потока электронов для приложенных обратных напряжений  $U_{обр.} = 0, 1, 5, 10, 50 \text{ V}$ , облученных при  $20^\circ\text{C}$  и  $250^\circ\text{C}$ .

Известно, что поведение барьерной емкости *p-n*-перехода во многом определяется параметрами глубоких уровней в базовой области структуры [7]. Как видно из результатов измерений, зависимости  $C_\Phi/C_0(\Phi)$  имеют неоднозначный характер. Анализ зависимостей в виде  $(S/C)^2$  и  $(S/C)^3$  от приложенного обратного напряжения для структур, облученных при  $250^\circ\text{C}$ , показывает, что они имеют нелинейный характер. Данное обстоятельство подтверждает, что в области пространственного заряда данных структур имеется несколько типов РЦ с различными концентрациями.

Исходя из вышеприведенного можно сделать вывод, что в структурах, облученных при  $250^\circ\text{C}$ , присутствуют различные РЦ с различной их концентрацией,

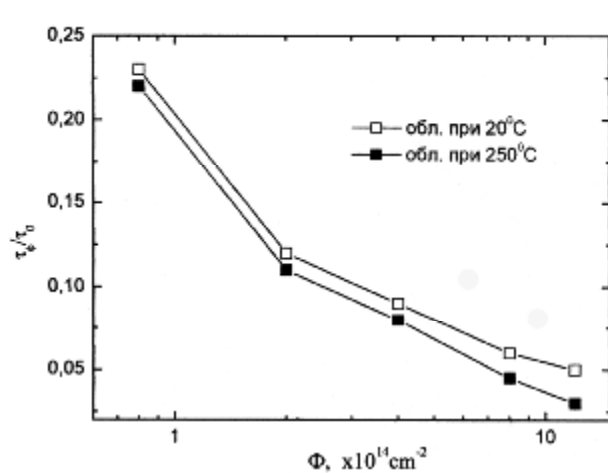


Рис. 4. Зависимость изменения относительных величин времени восстановления обратного сопротивления  $-\tau_\Phi/\tau_0(\Phi)$  от интегрального потока электронов, облученных при температуре  $20^\circ\text{C}$  и  $250^\circ\text{C}$ .

а также с определенным распределением их в базовой области структур с некоторым градиентом.

На рис. 4 приведены зависимости  $-\tau_\Phi/\tau_0(\Phi)$  изменения относительных величин времени восстановления обратного сопротивления от интегрального потока электронов, облученных при температуре  $20^\circ\text{C}$  и  $250^\circ\text{C}$ . При  $\Phi \sim 1,2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  на зависимостях наблюдается излом, который указывает на уменьшение эффективности введения РЦ и достижение некоторой стационарной концентрации дефектов, соответственно и некоторой стабилизации величины данного параметра структур.

При высокотемпературном облучении *p-n*-структур вследствие диссоциации *p-n*-структур вследствие диссоциации менее устойчивых РЦ появляются более устойчивые РЦ, контролируемые темп рекомбинации неосновных носителей заряда. Основными РЦ, которые оказывают влияние на вышеприведенные характеристики *p-n*-структур, являются акцепторные уровни:  $-A$ -центр ( $E_c - 0,18 \text{ эВ}$ ), а также центр с энергией  $E_v - 0,35 \text{ эВ}$  [8].

#### 4. Заключение

Проведенные исследования показали, что электрофизические характеристики диффузионных кремниевых *p<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup>*-структур сложным образом зависят от дозы и

---

---

температуры электронного облучения, которые определяются соотношением концентраций различных РЦ.

Таким образом, условия облучения, т.е. температура и интенсивность, оказывают существенное влияние на сечение образования тех или иных РЦ в  $p$ - $n$ -структурах, а также на характер распределения РЦ в базовой области структур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние температуры облучения и вида легирующей примеси на процессы дефектообразования в кремнии  $n$ -типа, облученном электронами / В.С. Вавилов, В.Б. Глазман, Н.У. Исаев, Б.Н. Мукашев, А.В. Спицын // ФТП. 1974. Т. 8. Вып. 3. С. 471-475.
2. Коршунов Ф.П., Марченко И.Г. Влияние электронного облучения при различных температурах на время жизни неосновных носителей заряда в эпитаксиальных кремниевых  $p$ - $n$ -структурах // ФТП. 1983. Т. 17. Вып. 3. С. 540-542.
3. Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. Мн.: Наука и техника, 1978.
4. Пагава Т.А. Зависимость кинетики отжига А-центров и дивакансий от температуры, энергии и дозы облучения в кристаллах  $n$ -кремния // ФТП. 2002. Т. 36. Вып. 10. С. 1159-1162.
5. Пагава Т.А. Влияние температуры облучения на эффективность введения мультивакансионных дефектов в кристаллах  $n$ -Si // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 8. С. 919-921.
6. Казакевич Л.А., Луганов П.Ф., Ткачев В.Д. Влияние дислокаций на накопление радиационных дефектов в кремнии // ФТП. 1980. Т. 14. Вып. 1. С. 128-142.
7. Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука, 1981. 176 с.
8. Марченко И.Г., Жданович Н.Е. Технологические особенности электронного облучения Si  $p^+$ - $n$ - $n^+$ -диодов при повышенных температурах // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 11. С. 1549-1552.

Поступила в редакцию 21.12.2011 г.  
Принята к печати 28.09.2012 г.