

очень слабо со временем изменяется шунтирующее сопротивление, несмотря на значительные изменения фототока и напряжения холостого хода. Это свидетельствует о том, что основная часть этого сопротивления связана с пассивными шунтами, скорее всего образованными сквозными микропорами в пленке. В то же время обнаружено значительное возрастание последовательного сопротивления для экспонированных образцов, при сравнительно слабом изменении этого параметра у образцов неэкспонированных. Одним из наиболее интересных результатов работы следует считать демонстрацию изменения тока короткого замыкания в образцах, выдержанных в темноте. Причем любопытно, что эти изменения примерно совпадают с изменениями этого параметра на свету. Это свидетельствует в пользу того, что этот эффект не связан с эффектом Стеблера—Вронского.

Библиографический список

1. Yang, Jeffrey. Metastability of amorphous silicon / Jeffrey Yang, Subhendu Guha // PV Module Reliability Workshop. – Golden (CO), 2010. (http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pvmrw_2010.html).
2. Zezin, D. A. Ocenka nekotoryh faktorov, vliyayushih na degradaciyu solnechnyh elementov na osnove a-Si : H / D. A. Zezin, D. V. Latohin // Amorfnye i mikrokristallicheskie poluprovodniki: sbornik trudov VIII Mezhdunarodnoi konferencii. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. – 452 s.
3. Meden, A. Fizika i primenenie amorfnyh poluprovodnikov / A. Meden, M. Sho. – M.: Mir, 1991. – 670 s.
4. Belyaev, Yu. K. Nadezhnost' tehniceskikh sistem: Spravochnik / Yu. K. Belyaev, V. A. Bogatyrev, V. V. Bolotin i dr. – M.: Radio i svyaz', 1985. – 608 s.
5. Zenova, E. V. Osnovy teorii i rascheta nadezhnosti izdelii elektronnoi tehniki / E. V. Zenova. – M.: Izd-vo MEI, 2005. – 68 s.
6. Voronkov, E. N. Nadezhnost' poluprovodnikovyyh priborov i mikroshem / E. N. Voronkov. – M.: Izd-vo MEI, 1986. – 47 s.
7. Kapur, K. C. Reliability in engineering design / K. C. Kapur, L. R. Lamberson. – N. Y.: John Wiley and Sons, 1977.
8. Raushenbah, G. Spravochnik po proektirovaniyu solnechnyh elementov / G. Raushenbah. – M.: Energoatomizdat, 1983.

Авторы выражают благодарность Э. Н. Воронкову за полезное обсуждение результатов работы.

УДК 621.315.592

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ Ge НА РАДИАЦИОННУЮ И ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРНЫХ *n-p-n-p*-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ CZ-Si<P, Ge>

© 2013 г. С. В. Быткин¹, Т. В. Критская², С. П. Кобелева³

¹ ОАО Металлургический комбинат «Запорожсталь», Украина

² Запорожская государственная инженерная академия, Украина,

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Исследованы характеристики мало-мощных и силовых тиристоров на основе бездислокационных монокристаллов кремния, легированных германием в диапазоне концентраций $N_{Ge} \sim (0,05 \div 1,5) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. С использованием методов обработки экспериментальных данных в среде STATISTICA и MathCAD оценены критериальные параметры тиристоров при действии облучения и высоких температурных градиентов. Показана целесообразность использования кремния, легированного германием, для повышения термической стабильности и радиационной стойкости приборов, подвергнутых действию γ -облучения в диапазоне доз до $2,94 \cdot 10^6 \text{ мЗв}$.

Ключевые слова: монокристалл, кремний, легирование германием, тиристор, γ -облучение, критериальные параметры.

Введение

Отсутствие силовых полупроводниковых приборов с высокой радиационной стойкостью является основным риском при создании электрооборудования космической техники, предназначенной для эксплуатации в условиях облучения [1].

Более того, в настоящее время проблема устойчивости к космическому излучению актуальна для диодов, тиристоров, запираемых тиристоров (GTO, *gate turn off*), запираемых тиристоров с жестким выключением (IGCT, *integrated gate-comutated thyristor*), биполяр-

ных транзисторов с изолированным затвором (IGBT, *insulated-gate bipolar transistor*), используемых в различных отраслях техники. Для доказательства подтверждения стойкости к этим воздействиям проводят испытания изделий в зонах с высоким уровнем космического излучения (вершины в Альпах), а также в специализированных лабораториях. Примером может служить накопленный опыт внедрения технологии GTO [2]. В процессе приемки тягового электропривода поездов нередко имели место отказы полупроводниковых элементов, выход из строя не только GTO-тиристоров,

но и включенных встречно–параллельно силовых диодов. Несмотря на контроль рабочих процессов с помощью магнитной записи и дорогостоящего измерительного оборудования, не удалось найти корреляции частоты отказов с какими–либо эксплуатационными режимами. Специалисты фирмы Siemens, работающие в области силовых полупроводниковых приборов, в ходе исследований пришли к выводу, что причиной отказов этих элементов является космическое излучение. Данный вывод подтвердили и дорогостоящие эксперименты, проводившиеся компанией в различных условиях, в том числе и в шахтах, расположенных глубоко под землей.

Причина того, что влияние космического излучения на полупроводниковые вентили, предназначенные для эксплуатации в наземных условиях, установлено лишь с появлением тиристорных ГТО, заключается в продолжительности воздействия на них высокого напряжения. В преобразователях, использующих обычные тиристоры, обратное амплитудное напряжение прикладывается к вентилю кратковременно, например, под действием коммутирующей цепочки. В результате время воздействия высокого напряжения и космического излучения на вентиль, находящийся в критическом режиме, оказывается небольшим. В тиристорах ГТО длительность воздействия высокого напряжения составляет 50 % всего времени переключения, вследствие чего показатель частоты отказов значительно повышается. Аналогичная проблема наблюдается при воздействии космического излучения на ИГСТ, особенно при перенапряжениях, вызванных коммутацией приборов, их использованием при предельно допустимых напряжениях, пониженных температурах или на значительных высотах [1]. Нелинейно возрастающая интенсивность отказов [3] объясняет причину малого использования в настоящее время тиристорных и других силовых полупроводниковых приборов в электронных системах, эксплуатируемых в условиях воздействия радиационного фона, пониженных температур, значительных высот, т. е. в бортовой аппаратуре. Фирмы–производители приборов с повышенной радиационной стойкостью, в частности транснациональная компания АВВ, никаких деталей, касающихся особенностей технологии таких приборов, не сообщают.

Следовательно, разработка методов повышения радиационной и термической стойкости многослойных полупроводниковых структур для стран СНГ по–прежнему является актуальной задачей, что подтверждено, в том числе, принятием Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы [4]. Документом предусмотрена разработка базовых технологий производства наиболее востребованных приборов для современной электропреобразовательной техники, включая IGBT–модули (в том числе на ток до 3000 А и напряжение до 6500 В), ИГСТ (на ток до 6000 А,

напряжение до 8000 В) и другие приборы. Интересен определенный скептицизм авторов Программы по отношению к возможности создания изделий со специальными свойствами. В частности, наряду с силовыми полупроводниковыми приборами, планируется разработать технологии вакуумных ключевых приборов, имеющих большую, по сравнению с силовыми полупроводниковыми приборами, электрическую прочность, быстродействие, стойкость к пробоям и воздействию электромагнитного и ионизирующего излучений.

Известно применение монокристаллов кремния [5], выращенных по методу Чохральского, легированных германием и фосфором (CZ–Si<P, Ge>), для создания интегральных микросхем и маломощных тиристорных с повышенной радиационной стойкостью [5–8]. Вместе с тем вопрос об особенностях использования таких монокристаллов в технологии дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в настоящее время требует дополнительного изучения [9]. Кроме того, следует отметить, что использование изовалентно легированного кремния рассматривается как принципиально важная задача при разработке специальных технологий [10].

Цель работы — исследование влияния легирования германием монокристаллов кремния, используемых при изготовлении маломощных тиристорных, на деградацию основных электрофизических характеристик $n-p-n-p$ –структур, эксплуатируемых в условиях радиационного воздействия, и оценка термической стабильности силовых тиристорных, изготовленных на CZ–Si<P, Ge> с различной концентрацией германия при действии высоких температурных градиентов.

Экспериментальная часть

При изготовлении маломощных тиристорных (обратное приложенное напряжение до 100 В) использовали монокристаллы кремния, выращенные по методу Чохральского, с концентрацией фосфора $\sim 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и германия $\sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (CZ–Si<P, Ge>), а также контрольные монокристаллы, не содержащие германий, с такой же концентрацией фосфора (CZ–Si<P>). Концентрации кислорода и углерода в монокристаллах составляли:

– $N_O = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $N_C = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (верхний торец);

– $N_O = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $N_C = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (нижний торец).

Тиристоры изготавливали по диффузионной планарной технологии. Облучение гамма–квантами (энергия не менее 660 кэВ) проводили в диапазоне доз от 0 до $2,94 \cdot 10^6 \text{ мЗв}$ на установке «Цезий–137». Изготовленная тиристорная $n-p-n-p$ –структура является удобной физической моделью для проведения такого анализа, поскольку большинство характеристик тиристора определяется качеством

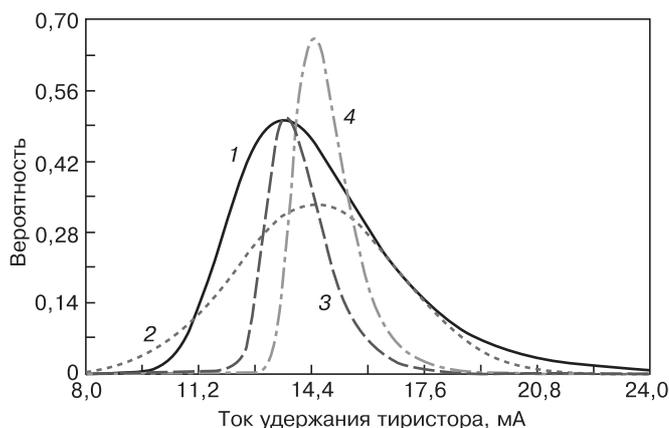


Рис. 1. Распределение тока удержания маломощных тиристоров на CZ-Si<P> (1, 2) и CZ-Si<P, Ge> (3, 4): 1, 3 — до облучения, 2, 4 — после облучения

его широкой базовой области (~150 мкм при толщине пластины ~200 мкм).

Для обработки полученных результатов использованы возможности среды STATISTICA6.0 и MathCAD11 [11, 12]. Оценивали плотность вероятности распределения токов удержания I_h , токов утечки, токов управления и прямого падения напряжений в партиях из 5 ед. Характеристики тиристора выбраны, исходя из физики работы $n-p-n-p$ -структуры [13]. Например, ток удержания — параметр, оцениваемый по вольт-амперной характеристике. Он определяет работоспособность тиристора: при облучении увеличивается, и тиристор закрывается. Распределение тока удержания I_h маломощных тиристоров на Si и Si<Ge> приведено на рис. 1.

Наиболее вероятные значения величин токов удержания тиристоров на Si и Si<Ge> до и после облучения практически одинаковы, однако ширина пика для тиристоров на Si<Ge> намного меньше

(табл. 1). Помимо того, наличие «хвостов» в правой части кривой распределения для тиристоров на Si свидетельствует о том, что имеется достаточно высокая вероятность их отказов как до, так и после облучения. Малая ширина пика распределения тока удержания тиристоров на основе Si<Ge> ($b_{nSi}/b_{nSiGe} = 2,5$ до облучения и $\sigma_{nSi}/b_{nSiGe} = 3,4$ после облучения) может свидетельствовать о повышенной (в 2—3 раза) воспроизводимости характеристик исследуемых структур по сравнению с тиристорами на основе Si. Следовательно, можно говорить и о технологичности кремния, легированного германием. При его использовании нет необходимости корректировать серийный технологический маршрут изготовления тиристоров, имеющийся для нелегированного германием кремния. Сохранение формы кривой распределения может свидетельствовать, в том числе, и о хорошей термической стабильности кремния, легированного германием, при технологических термообработках процессов диффузии бора, фосфора ($T \sim 1000$ °C), окисления (~1250 °C) и др., в отличие от нелегированного германием кремния.

Распределение токов утечки I_1 маломощных тиристоров на Si и Si<Ge> приведено на рис. 2.

Следует отметить существенное влияние γ -облучения на изменение формы кривой распределения токов утечки как для контрольных, так и для исследуемых тиристоров (табл. 2). Наиболее вероятное значение I_1 для контрольных образцов уменьшается примерно на 30 % после воздействия облучения, однако его численное значение практически в 2 раза выше, чем у исследуемых тиристоров.

Распределение тока управления I_b маломощных тиристоров на Si и Si<Ge> приведено на рис. 3, а характеристики модели эмпирического распределения I_b — в табл. 3. Ярко выражена высокая воспроизво-

Таблица 1

Характеристики модели эмпирического распределения I_h

Тип исследуемого материала	Функция плотности распределения вероятности	
	до облучения	после облучения
Контрольный CZ-Si<P>	$\frac{1}{b_{nSi}} e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}}}$ <p>(экстремальное распределение) $a_{nSi} = 13,6, b_{nSi} = 1,8719$</p>	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{nSi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-\mu_{nSi})}{\sigma_{nSi}}\right]^2}$ <p>(нормальное распределение) $\mu_{nSi} = 14,5, \sigma_{nSi} = 2,3238$</p>
Исследуемый CZ-Si<P, Ge>	$\frac{1}{b_{nSiGe}} e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}}}$ <p>(экстремальное распределение) $a_{nSiGe} = 13,7, b_{nSiGe} = 0,7549$</p>	$\frac{1}{b_{nSiGe}} e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}}}$ <p>(экстремальное распределение) $a_{nSiGe} = 14,45, b_{nSiGe} = 0,6952$</p>

Здесь и далее: $a_{nSi}, b_{nSi}, a_{nSiGe}, b_{nSiGe}$ — численные значения параметров функций распределения плотности вероятности для тиристоров на контрольном CZ-Si<P> и исследуемом CZ-Si<P, Ge>, соответственно; μ_{nSi} и σ_{nSi} — среднее значение и дисперсия функции распределения для приборов на контрольном CZ-Si<P> после облучения; x — текущее значение измеряемой электрофизической величины.

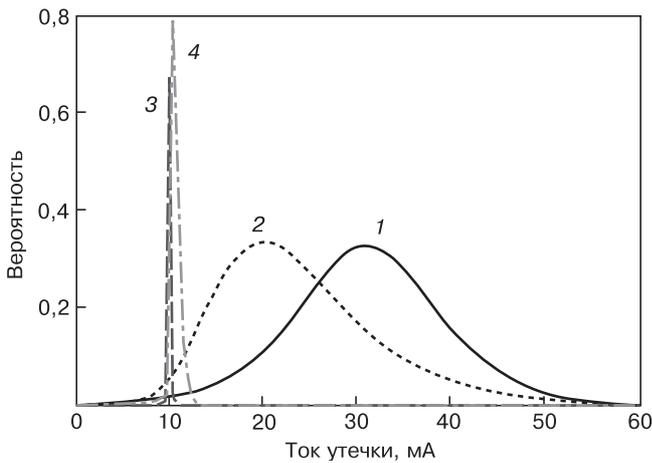


Рис. 2. Распределение токов утечки маломощных тиристоров на CZ-Si<P> (1, 2) и CZ-Si<P, Ge> (3, 4): 1, 3 — до облучения, 2, 4 — после облучения

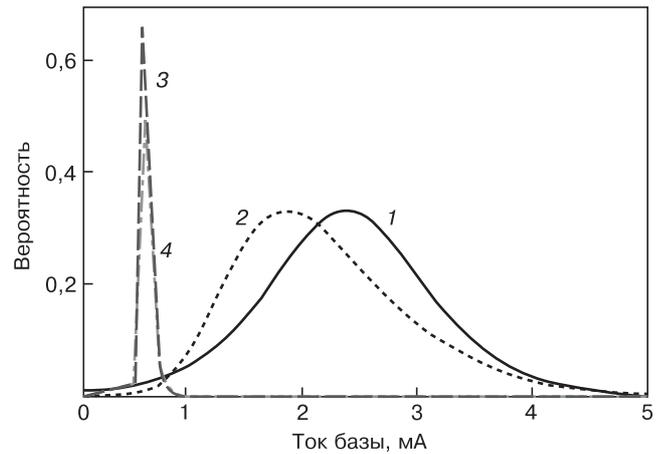


Рис. 3. Распределение токов управления базы маломощных тиристоров на основе CZ-Si<P> (1, 2) и CZ-Si<P, Ge> (3, 4): 1, 3 — до облучения, 2, 4 — после облучения

димность этой характеристики для приборов, изготовленных на основе CZ-Si<P, Ge>, а также практиче-

ски полное отсутствие ее изменения в исследуемом диапазоне доз облучения.

Таблица 2

Характеристики модели эмпирического распределения I₁

Тип исследуемого материала	Функция плотности распределения вероятности	
	до облучения	после облучения
Контрольный CZ-Si<P>	$\frac{1}{b_{nSi}} e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}} \left[1 + e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}} \right]^{-2}$ <p>(логистическое распределение) $a_{nSi} = 31, b_{nSi} = 4,8567$</p>	$\frac{1}{b_{nSi}} e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}}}$ <p>(экстремальное распределение) $a_{nSi} = 19,9602, b_{nSi} = 6,9844$</p>
Исследуемый CZ-Si<P, Ge>	$\frac{1}{b_{nSiGe}} e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}}$ <p>(распределение Лапласа) $a_{nSiGe} = 10, b_{nSiGe} = 0,0447$</p>	$\frac{1}{b_{nSiGe}} e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}}}$ <p>(экстремальное распределение) $a_{nSiGe} = 10,4, b_{nSiGe} = 0,4$</p>

Таблица 3

Характеристики модели эмпирического распределения I_b

Тип исследуемого материала	Функция плотности распределения вероятности	
	до облучения	после облучения
Контрольный CZ-Si<P>	$\frac{1}{b_{nSi}} e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}} \left[1 + e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}} \right]^{-2}$ <p>(логистическое распределение) $a_{nSi} = 2,38, b_{nSi} = 0,4426$</p>	$\frac{1}{b_{nSi}} e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}}}$ <p>(экстремальное распределение) $a_{nSi} = 1,8535, b_{nSi} = 0,6417$</p>
Исследуемый CZ-Si<P, Ge>	$\frac{1}{b_{nSiGe}} e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}}}$ <p>(экстремальное распределение) $a_{nSiGe} = 0,6153, b_{nSiGe} = 0,0416$</p>	$\frac{1}{b_{nSiGe}} e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}}}$ <p>(экстремальное распределение) $a_{nSiGe} = 0,62, b_{nSiGe} = 0,0462$</p>

Полученные результаты указывают на принципиальную возможность применения Si<Ge> с концентрацией германия $\sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для изготовления маломощных тиристоров с низкими токами утечки как до, так и после облучения. Для высоковольтных приборов оптимальная концентрация германия, обеспечивающая надежность изделий в экстремальных условиях эксплуатации, должна достигать $\approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Для оценки термической стабильности силовых тиристоров Т122 (рабочее напряжение до 1200 В, ток 20—25 А) проводили опробование монокристаллов кремния марок Б45/45,5; Б45/47,5 (ТУ 48–4–294–87) в их серийном производстве. Использовали монокристаллы кремния ориентации <111> с концентрацией $N_P \approx 1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_O = (9 \div 6) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_C < 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, легированные и не легированные Ge. Монокристаллы выращивали в идентичных условиях из загрузки поликристаллического Si с $N_P = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_B = 3,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $N_C < 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в потоке Ar. Легирование германием проводили до концентраций, представленных в табл. 4. Процессы резки и подготовки пластин из монокристаллов Si и Si<Ge> выполняли параллельно. Высокотемпературные операции пластины проходили одновременно. Отбор контрольных пластин для оценки поперационного выхода годного проводили по стандарту предприятия–изготовителя приборов.

В табл. 4 представлен процент выхода годных (ПВГ) приборов классов 10, 11, 12 (значение повторяющегося импульсного напряжения в закрытом состоянии 1000, 1100 и 1200 В соответственно). При использовании монокристаллов Si<Ge> для изготовления силовых тиристоров типа Т122 наиболее оптимальной оказалась концентрация $N_{Ge} \sim (0,6 \div 1) \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. При такой N_{Ge} наблюдали высокий ПВГ приборов 12–го класса (большой, чем в серийной технологии, использующей кремний, не легированный германием) и устойчивость динамических характеристик тиристоров в процессе термоциклирования ($-60, +125 \text{ }^\circ\text{C}$), оцениваемую по выходу приборов с токами утечки, не превышающими норму, равную

3 мА. При $N_{Ge} \sim (1,6 \pm 0,5) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ наблюдали существенное снижение ПВГ приборов 12–го класса [5].

Причиной наблюдаемых явлений может быть повышение термической стабильности твердого раствора кислорода, обусловленное присутствием германия в решетке кремния. Скорее всего это может быть связано с тем, что германий в концентрации $N_{Ge} \sim (0,6 \div 1) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ приводит к существенному уменьшению скорости генерации термодонорных центров, характерных для нелегированного кремния, что повышает термическую стабильность CZ–Si<Ge> [14]. Причиной существенного уменьшения скорости термической деградации физических свойств монокристаллов CZ–Si<Ge> является, по мнению авторов, установленное коррелированное распределение связанных атомов германия и кислорода (без формирования химических связей O и Ge), возможное при $N_{Ge} = (1 \div 9) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Эффект обусловлен тем, что введение германия приводит к блокированию внутренних упругих напряжений, связанных, как было показано с помощью метода электронного парамагнитного резонанса, с наличием кислорода [15, 16]. Дополнительным аргументом в пользу связи наблюдаемых эффектов с взаимодействием германия и межузельного кислорода является то, что спектр поглощения кислорода в кремнии, легированном германием до концентраций, больших 10^{20} см^{-3} , полностью изменяется по сравнению со спектром для нелегированного германием кремния [17]. Более того, достигнутый положительный эффект по уменьшению токов утечки сохраняется и при облучении $n-p-n-p$ -структур. В то же время достижение высокой термической стабильности тиристоров за счет подавления германием генерации термодоноров имеет и отрицательную сторону, а именно: рост падения напряжения на открытой структуре (рис. 4) как до, так и после облучения. Однако определенное улучшение радиационной стойкости, выраженное в отсутствии роста падения напряжения и сужении кривой распределения прямого падения напряжения, наблюдается для CZ–Si<P, Ge> и в этом эксперименте, что наглядно отражено в изменении параметров

Таблица 4

Выход годных тиристоров типа Т122, изготовленных по идентичной технологии из Si и Si<Ge>

№ монокристалла	$N_{Ge}, \text{ см}^{-3}$	Объем партии, ед.	ПВГ после термоциклирования ($-60, +125 \text{ }^\circ\text{C}$), %	Распределение по классам, %		
				10	11	12
014	0	421	1,5	30	22	15
936	$(5,6 \pm 0,3) \cdot 10^{18}$	249	7,5	3,2	22,2	66,7
052	$(6,3 \pm 0,2) \cdot 10^{19}$	617	11	6,0	13,0	77,0
963	$(1,1 \pm 0,5) \cdot 10^{20}$	473	10	0,8	8,3	79,5
956	$(1,6 \pm 0,5) \cdot 10^{20}$	452	0	8,2	14,8	45,9

Таблица 5

Характеристики модели эмпирического распределения падения напряжения на тиристоре в открытом состоянии ($V_{v,d}$)

Тип исследуемого материала	Функция плотности распределения вероятности	
	до облучения	после облучения
Контрольный CZ-Si<P>	$\frac{1}{b_{nSi}} e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}}}$ (экстремальное распределение) $a_{nSi} = 1,2, b_{nSi} = 0,4$	$\frac{1}{b_{nSi}} e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSi})}{b_{nSi}}}}$ (экстремальное распределение) $a_{nSi} = 1,4, b_{nSi} = 0,5$
Исследуемый CZ-Si<P, Ge>	$\frac{1}{b_{nSiGe}} e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}}}$ (экстремальное распределение) $a_{nSiGe} = 3,95, b_{nSiGe} = 0,8$	$\frac{1}{b_{nSiGe}} e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}} e^{-e^{-\frac{(x-a_{nSiGe})}{b_{nSiGe}}}}$ (экстремальное распределение) $a_{nSiGe} = 3,9, b_{nSiGe} = 0,7$

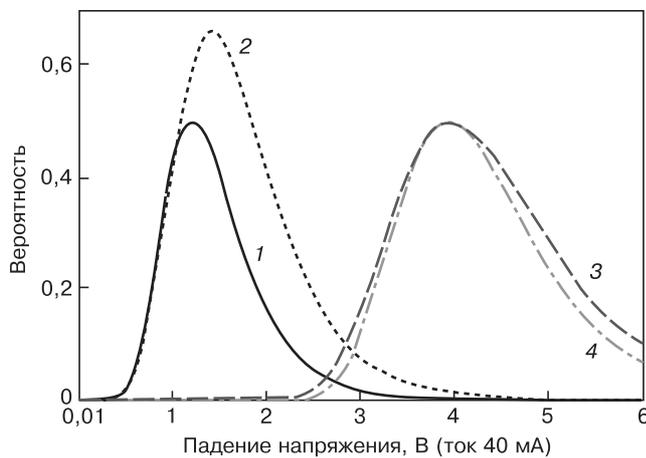


Рис. 4. Распределение падения напряжения на маломощных тиристорах, изготовленных на CZ-Si<P> (1, 2) и CZ-Si<P, Ge> (3, 4): 1, 3 — до облучения, 2, 4 — после облучения

распределения падения напряжения на тиристоре в открытом состоянии $V_{v,d}$, приведенных в табл. 5.

Заключение

Подтверждена целесообразность использования монокристаллов CZ-Si<Ge> с $N_{Ge} \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при изготовлении маломощных планарных тиристоров (прямой ток 20—50 мА), что позволяет улучшить рабочие характеристики, а также уменьшить их деградацию при действии γ -облучения в диапазоне доз до $2,94 \cdot 10^6 \text{ мЗв}$. Анализ распределения токов удержания тиристоров из кремния показал, что имеется достаточно высокая вероятность их отказов как до, так и после облучения. Существенно меньшая (в 2—3 раза) полуширина кривой распределения этого параметра в тиристорах из кремния, легированного германием, свидетельствует о большей воспроизводимости характеристик исследуемых структур по сравнению с тиристорами на основе Si.

Сделано предположение, что сохранение низких токов утечки маломощных тиристорных структур после облучения свидетельствует о повышенной радиационной стойкости силовых приборов, изготовленных на кремнии, легированном германием.

Показана целесообразность использования монокристаллов кремния, легированных германием до концентрации $N_{Ge} \sim (0,6 \div 1) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, для повышения термической стабильности (оцениваемой по токам утечки структур) силовых тиристоров с рабочим напряжением до 1200 В на токи 20—25 А.

Библиографический список

1. Catrene scientific committee working group: Integrated power & energy efficiency [Elektronnyi document] (http://www.catrene.org/web/downloads/IPEE_Report_by_Catrene%20Sci_Comm.pdf).
2. Weigel, W.-D. Moderne drehstromantriebstechnik — stand und perspektiven / W.-D. Weigel // ZEVrail Glasers Annalen (Tagungsband SFT Graz). — 2002. — P. 112—125.
3. Kaminski, N. Vozdeistvie kosmicheskogo izlucheniya na intensivnost' otkazov IGCT [Elektronnyi document] / N. Kaminski, A. Chekmarev, I. Korzina, T. Styasni // Silovaya elektronika. — 2008. — N 1. — P. 30—32 (http://www.power-e.ru/2008_1_30.php).
4. O Federal'noi celevoi programme «Nacional'naya tehnologicheskaya baza» na 2007—2011 gody (v red. Postanovleniya Pravitel'stva RF ot 26.11.2007 N 809). [Elektronnyi document] (<http://www.intpark.noolab.ru/uploads/1245030251.doc>).
5. Kritskaya, T. V. Upravlenie svoistvami i razrabotka promyshlennoi tehnologii monokristallicheskogo kremniya dlya elektroniki i solnechnoi energetiki: Diss. d-ra. tehn. n. — Zaporozh'e, 2006. — 375 p.
6. Bytkin, S. V. Silicon doped with germanium (n-Si<Ge>) usage for manufacturing of radiation hardened devices and integrated circuits. / S. V. Bytkin // Fourth Europ. Conf. on Radiation and Its Effects on Components and Systems Proceedings. — Cannes (France), 1997. — P. 141—146.
7. Bytkin, S. V. Materialy i processy v tehnologii kremnievyyh priborov, ustoychivyyh k deistviyu ioniziruyushih izluchenii: analiz effektivnosti primeneniya / S. V. Bytkin, O. V. Bytkina — Zaporozh'e : Izd-vo ZGIA, 1997. — 84 p.
8. Bytkin, S. V. Radiacionnaya stoikost' planarnyyh n-p-n-struktur, izgotovlennykh iz monokristallov kremniya s razlichnoi koncentraciei germaniya / S. V. Bytkin, T. V. Kritskaya // Skladni sistemi i procesi — 2003. — N 2. — P. 90—96.

9. **Barabash L. I.** Сучасні методи підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів / L. I. Barabash, I. M. Vishnevskii, A. A. Groza, A. Ya. Karpenko, P. G. Litovchenko, M. I. Starchik // *Voprosy atomnoi nauki i tehniki. Ser. 90: Fizika radiacionnyh povrezhdenii i radiacionnoe materialovedenie.* – 2007. – N 2. – P. 182–189.

10. Defense technology strategy for the demands of the 21st century [Elektronnyi document] (http://www.science.mod.uk/mod-www/content/dts_complete.pdf).

11. **Borovikov, V.** STATISTICA. Iskusstvo analiza dannyh na komp'yutere. Dlya professionalov / V. Borovikov. – SPb. : Piter, 2003. – 688 p.

12. **Kudryavcev, V. M.** Mathcad 11: Polnoe rukovodstvo po russkoi versii. / V. M. Kudryavcev – M. : DMK Press, 2005. – 592 p.

13. **Gerlah, V.** Tiristory / V. Gerlah – M. : Energoatomizdat, 1985. – 345 p.

14. **Kritskaya, T. V.** Uprugie napryazheniya v kremnii s vnutrennimi getterami / T. V. Kritskaya, V. E. Kustov, N. A. Tripachko, V. I. Shahovcov // *Elektronnaya tehnika. Ser. Materialy.* – 1989. – Iss. 4 (241). – P. 41–43.

15. **Kritskaya, T. V.** Osobennosti spektrov IK-poglosheniya termodonorov v kristallah Si : Ge / T. V. Kritskaya, L. I. Hirunenکو, V. I. Shahovcov, V. I. Yashnik // *FTP.* – 1990. – T. 24, Iss. 6. – P. 1129–1132.

16. **Kustov, V. E.** Vnutrennie uprugie deformacii v kremnii / V. E. Kustov, T. V. Kritskaya, N. A. Tripachko, L. I. Hirunenکو, V. I. Shahovcov, V. I. Yashnik // *Neorgan. materialy.* – 1991. – N 6. – P. 1116–1118.

17. **Khironenko, L. I.** Oxygen in silicon doped with isovalent impurities. / L. I. Khironenko, Yu. V. Pomozov, M. G. Sosnin, V. K. Shinkarenko // *Physica B.* – 1999. – V. 273–274. – P. 317–321.

Статья написана по материалам доклада, представленного на Седьмой Международной конференции «Кремний–2010».

УДК 539.26:621.315.592

ЗАВИСИМОСТЬ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛЕНОК GaAs НА ВИЦИНАЛЬНЫХ ПОДЛОЖКАХ Si(001) ОТ СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВЫХ МОНОСЛОЕВ ПРОСЛОЙКИ GaP

© 2013 г. И. Д. Лошкарев, А. П. Василенко, Е. М. Труханов, А. В. Колесников, А. С. Ильин, М. А. Путятю, Б. Р. Семягин, В. В. Преображенский
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

Выявлена существенная зависимость деформационного состояния кристаллической решетки пленок GaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии от способа зарождения первых слоев прослойки GaP (50 нм) на вицинальной подложке Si(001) 4° вокруг оси <011>. Рост GaP начинался послойно с галлиевого или фосфорного подслоя. Установлено, что в случае зарождения GaP с галлия, пленка GaAs имеет значительный поворот кристаллической решетки вокруг направления <011>. При формировании прослойки с фосфорного подслоя заметен поворот пленки GaAs вокруг <001>. Степень релаксации пленки составляет более 100 %, она находится в латерально растянутом состоянии. Анализ проведен с использованием модели триклинных искажений. Представлена карта рассеяния в обратном пространстве, полученная с помощью рентгеновской дифрактометрии в трехосевой схеме малого разрешения. На карте явно виден факт поворота кристаллической решетки пленки GaAs.

Ключевые слова: релаксация, гетеросистемы, вицинальные границы раздела.

Введение

Выращивание методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) пленок соединений A^{III}B^V на недорогих и прочных подложках Si(001) имеет большое значение для реализации оптико-электронных интегральных схем и высокоэффективных солнечных элементов. Различие в постоянных решетки между соединениями A^{III}B^V и кремнием является одной из серьезных проблем для гетероэпитаксиального роста соединений A^{III}B^V на Si. Также представляет сложность переход от неполярного полупроводника Si к полярному, поэтому используют эпитаксиальные слои GaP [1]. Привлекательность применения фосфида галлия обусловлена тем, что параметр его кристаллической решетки близок к параметру решетки кремния.

Использование его в качестве прослойки между Si и GaAs позволяет решать задачи по зарождению эпитаксиального слоя полярного полупроводника на неполярном и переходу к другому параметру решетки слоя отдельно. При этом все кристаллические несовершенства, обусловленные разницей параметров решеток и коэффициентов термического расширения сопрягаемых материалов, будут сосредоточены в границе раздела между слоями A^{III}B^V. Для анализа таких гетеросистем хорошо подходит метод рентгеновской дифрактометрии, обладающий высокой чувствительностью к деформациям кристаллической решетки.

Настоящая работа посвящена исследованию деформационного состояния пленок GaAs на вицинальных подложках Si(001) в зависимости от способа зарождения