

06.2

## Исследование процесса обратного восстановления $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ гетеродиодов, изготовленных прямым сращиванием

© И.В. Грехов, Е.И. Белякова, Л.С. Костина, А.В. Рожков,  
Т.С. Аргунова, Г.А. Оганесян

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: konst@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 февраля 2011 г.

Приведены результаты исследования процесса обратного восстановления  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  гетеродиодов, сформированных прямым сращиванием пластин кремния  $n$ -типа проводимости ориентации (111) с пластинами  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$   $p$ -типа проводимости той же ориентации, с содержанием германия от 4 до 8 at. %. Показано, что с увеличением концентрации германия  $N_{\text{Ge}}$  в  $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое время обратного восстановления гетеродиодов уменьшается. Наличие участка резкого спада обратного тока на характеристике восстановления может быть объяснено существованием вблизи границы сращивания узкой области с пониженным по отношению к объему временем жизни неосновных носителей заряда вследствие сосредоточения здесь дислокаций несоответствия, генерируемых при сращивании.

Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность создания в системе  $\text{Si}-\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  быстро восстанавливающихся диодов для силовой полупроводниковой техники на основе технологии прямого сращивания.

Важным элементом схем мощных преобразователей электрической энергии, создаваемых на основе современных силовых полупроводниковых переключателей (биполярно-полевых транзисторов либо запираемых тиристоров), являются мощные быстродействующие высоковольтные диоды, включенные встречно-параллельно переключателю и работающие в жестких условиях быстрой коммутации больших мощностей с большими скоростями нарастания обратного тока. Такие приборы должны сочетать в себе малое падение напряжения во включенном состоянии и одновременно быстрое и „мягкое“ восстановление блокирующей способности. Подобное сочетание может быть достигнуто путем создания определенной формы распределения в

базе диода, накопленной после протекания прямого тока электронно-дырочной плазмы, когда ее концентрация в узкой области вблизи *pn*-перехода существенно снижена в сравнении с остальной частью базы. Одно из решений проблемы — повышение в этой области концентрации рекомбинационных центров, снижающих время жизни неосновных носителей, путем облучения протонами либо  $\alpha$ -частицами с энергией, обеспечивающей здесь высокую концентрацию дефектов [1]. Однако необходимость использования ускорителей  $\alpha$ -частиц (так же как и протонов) с энергией  $\sim 10\text{--}15\text{ MeV}$  делает процесс изготовления быстро восстанавливающихся мощных диодов весьма трудоемким и энергозатратным.

В данной работе мы рассматриваем возможность создания высоковольтных диодов с быстрым восстановлением путем формирования гетеродиодных структур в системе  $\text{Si}\text{--}\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на основе технологии прямого сращивания [2]. Ранее нами было показано, что дислокации несоответствия, возникающие при сращивании, сосредоточены в узком слое вблизи интерфейса и, таким образом, не влияют на исходные свойства сращиваемых пластин, что открывает возможность формирования структур большой площади с заранее заданными характеристиками [3,4].

Целью работы является исследования процесса обратного восстановления диодов, изготовленных прямым сращиванием кремниевых пластин с пластинами  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с различным содержанием германия ( $0.04 < x < 0.08$ ).

Для формирования диодных структур использовались пластины кремния *n*-типа проводимости ориентации (111) с удельным объемным сопротивлением  $\rho_v \sim 10\ \Omega \cdot \text{cm}$  толщиной  $\sim 350\ \mu\text{m}$  и пластины  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , вырезанные из кристаллов, выращенных методом Чохральского и легированных в процессе роста бором до концентраций  $\sim 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$  [5]. В таблице приведены измеренные перед сращиванием параметры используемых пластин  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Увеличение концентрации Ge сопровождается уменьшением удельного сопротивления материала и снижением времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) вследствие роста плотности дислокаций [6,7]. Подвижность дырок при этом меняется слабо.

Процедура прямого сращивания осуществлялась по модифицированной технологии, которая обеспечивала формирование рельефного интерфейса, способствовавшего уменьшению плотности дислокаций

Параметры пластин  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , используемых для сращивания

Ge, at.%	Ориентация	Тип проводимости	Толщина пластины, $\mu\text{m}$	Удельное сопротивление $\rho_v, \Omega \cdot \text{cm}$	Время жизни $\tau, \mu\text{s}$	Подвижность $\mu, \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
4.1	111	<i>p</i>	350	40.0	20	268
5.3	111	<i>p</i>	350	13.7	6	262
7.6	111	<i>p</i>	350	1.8	2	217

решетки, снижению упругих напряжений и ликвидации газовых пузырей на границе раздела [3]. После сращивания производилось долегирование *p*- и *n*-сторон *pn*-гетероструктуры для создания  $p^+$ - и  $n^+$ -слоев и последующего химического осаждения никеля для изготовления контактов. Затем из полученных *pn*-структур вырезались образцы диаметром  $\sim 0.4 \text{ cm}$ ; для защиты от поверхностного пробоя и обеспечения минимальной величины тока утечек краевой контур подвергался химическому травлению и пассивации. Обратные напряжения изготовленных таким образом диодов составляли величину от 100 до 320 V при токе утечки менее  $100 \mu\text{A}$  ( $T = 300 \text{ K}$ ).

Проведенные после сращивания повторные электрические измерения показали, что параметры пластин Si и SiGe по обе стороны от интерфейса сформированной *pn*-структуры остались практически неизменными.

Для исследования процесса обратного восстановления через диод пропускался прямой ток  $I_F$ , затем полярность приложенного к структуре напряжения менялась на обратную и начинался спад прямого тока. После пересечения нулевой линии через диод протекает ток обратного восстановления, форма которого схематически показана на рис. 1. Время протекания этого тока можно подразделить на  $t_A$  — время изменения тока от нулевого до пикового значения  $I_{RM}$  и  $t_B$  — время, в течение которого обратный ток изменяется от  $I_{RM}$  до тока утечки („хвостового“ тока). На рис. 2, *a* схематически представлена конструкция, а на рис. 2, *b* — осциллограммы процесса обратного восстановления исследуемых образцов при плотности прямого тока  $\sim 60 \text{ A/cm}^2$ . Для всех концентраций Ge наблюдается достаточно резкое и примерно одинаковое нарастание обратного тока до пикового значения (при  $N_{\text{Ge}} = 4.1, 5.3$  и  $7.6 \text{ at.}\%$ ,  $t_A = 300, 220, 250 \text{ ns}$  соответственно). На этапе спада  $t_B$  четко прослеживается наличие двух

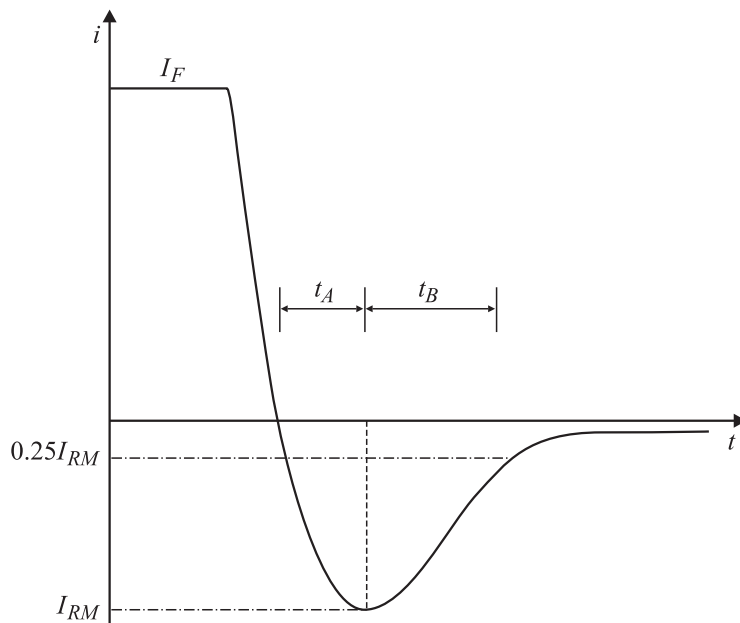
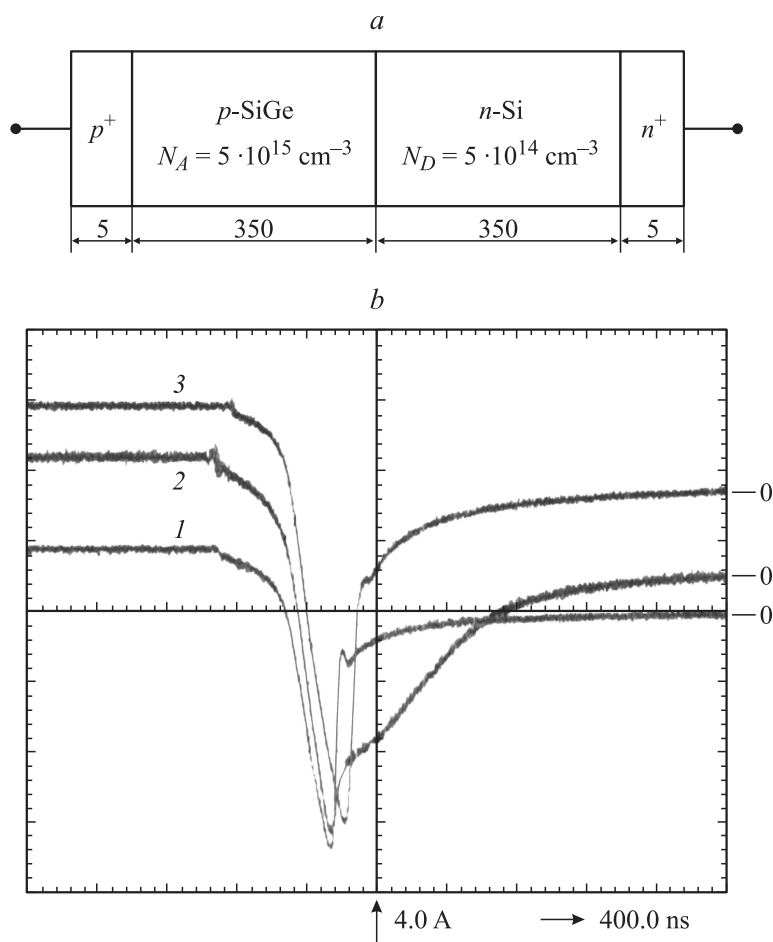


Рис. 1. Форма тока обратного восстановления диода.

участков: начального — быстрого ( $< 100$  ns для  $N_{Ge} = 4.1$  at.%,  $\sim 20$  ns для  $N_{Ge} = 5.3$  at.% и  $< 20$  ns для  $N_{Ge} = 7.6$  at.%), заканчивающегося коротким и резким всплеском тока, и последующего — существенно более длинного и плавного, длительность которого на уровне  $0.25I_{RM}$  составляет величину  $\sim 960$ ,  $400$  и  $320$  ns, а по полуширине —  $800$ ,  $150$ ,  $< 100$  ns для  $N_{Ge} = 4.1$ ,  $5.3$  и  $7.6$  at.% соответственно. Хорошо видно, что время обратного восстановления SiGe/Si гетеродиодов уменьшается почти на порядок с увеличением содержания Ge в SiGe-слое от 4.1 до 7.6 at.%.

При протекании прямого тока через  $n(\text{Si})/p(\text{SiGe})$ -гетеропереход наличие разрывов  $\Delta E_v$  в валентной зоне при контакте  $p\text{-SiGe}$  с  $n\text{-Si}$  создает дополнительный барьер для диффузии дырок из более узкозонного  $p(\text{SiGe})$ -слоя в  $n(\text{Si})$ -слой, при этом  $\Delta E_v$  тем выше, чем выше концентрация Ge. В нашем случае при  $N_{Ge} \leq 8$  at.% этот эффект не является превалирующим ( $\Delta E_v < 126$  meV [8–9]), однако мы учитываем его,



**Рис. 2.** *a* — схематическое изображение конструкции исследуемых гетеродных  $n\text{Si}/p\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -структур, размеры слоев даны в  $\mu\text{m}$ ; *b* — осциллограммы процесса восстановления сформированных прямым сращиванием  $n\text{Si}/p\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -гетероструктур при переключении прямого смещения на обратное. Содержание Ge в *p*-слое: 1 — 7.6 at.%; 2 — 4.1 at.%; 3 — 5.3 at.%.

поскольку диапазон  $5 \text{ at.}\% \leq N_{\text{Ge}} \leq 15 \%$  является предпочтительным в кремний-германиевой электронике при конструировании  $n\text{Si-}p\text{SiGe-}n\text{Si}$  HBTs (Heterojunction Bipolar Transistor) с повышенной эффективностью  $n\text{Si-}p\text{SiGe}$ -гетероземиттера. Дальнейшее увеличение концентрации Ge приводит к увеличению плотности дислокаций несоответствия свыше  $10^6 \text{ cm}^{-2}$ , ухудшающих электрические характеристики приборов [9,10].

При протекании электронной компоненты прямого тока величина накопленного в  $p$ -слое заряда определяется временем жизни ННЗ в этом слое, которое уменьшается с увеличением концентрации германия. Таким образом, в  $n(\text{Si})/p(\text{SiGe})$ -гетеродиодах малое время обратного восстановления, определяемое величиной накопленного в структуре заряда, может быть достигнуто за счет выбора для срачивания пластин  $p\text{-SiGe}$  с соответствующей наперед заданной исходной концентрацией Ge, что подтверждается экспериментально (см. осциллограммы, рис. 2, *b*). При этом, поскольку дислокации несоответствия при срачивании сосредоточиваются в узкой области вблизи интерфейса, именно эта область с пониженным по отношению к объему временем жизни ННЗ ответственна за быстрый спад с короткими и резкими всплесками обратного тока на начальном участке этапа  $t_B$ .

Проведенное ранее в [7,11] исследование прямых ВАХ  $n(\text{Si})/p(\text{SiGe})$ -гетеродиодов, изготовленных по технологии прямого срачивания, показало, что увеличение содержания Ge от 2.5 до 8 at.% сопровождается увеличением плотности дислокаций в SiGe-слое не более чем до  $10^6 \text{ cm}^{-2}$  и практически не сказывается на величине прямого падения напряжения на диодной структуре при оптимизированных исходных параметрах  $p$ - и  $n$ -слоев, т.е. не приводит к ухудшению ВАХ при плотностях токов вплоть до  $200 \text{ A/cm}^2$ .

Таким образом, технология прямого срачивания открывает возможность формировать высоковольтные диодные структуры, характеристики обратного восстановления которых (в том числе и высокое быстродействие по выключению) при достаточно высоких плотностях коммутируемого тока могут быть заданы путем подбора оптимальной комбинации известных и измеренных заранее параметров, используемых для срачивания исходных пластин кремния и  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности использования метода прямого срачивания в силовой полупроводниковой технике.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН „Физико-технические проблемы полупроводниковой электроники больших мощностей“.

## Список литературы

- [1] *Li G., Liu Z.Q., Golland A., Wakeman F.* // Proceedings of EPE'2005. P. 44–46.
- [2] *Tong Q-Y., Gösele U.* // Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology. J. Wiley&Sons. Inc., 1999. 297 p.
- [3] *Grekhov I.V., Argunova T.S., Kostina L.S.* et al. // J. Electrochem. Soc. 1997. V. 144. N 2. P. 622–627.
- [4] *Grekhov I.V., Kostina L.S., Argunova T.S.* et al. // Proceedings of European Power Electronics. EPE'97, 1997, November 6–8, Trondheim, Norway. P. 2087–2092.
- [5] *Abrosimov N., Lüdge A., Riemann H., Schröder W.* // J. Cryst. Growth. 2002. V. 237–239. P. 356.
- [6] *Hirose F., Souda Y., Nakano K.* et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2001. V. 48. N 10. P. 2417–2420.
- [7] *Argunova T.S., Jung J.W., Je J.H., Abrosimov N.V., Grekhov I.V., Kostina L.S., Rozhkov A.V., Sorokin L.M., Zabrodskii A.G.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. N 8. P. 1–6.
- [8] *Bean E.C.* // Proc. IEEE. 1992. V. 80. P. 571.
- [9] *Roberts V., Allsopp D.W.E.* // Semicond. Sci. Technol. 1996. V. 11. P. 1346–1353.
- [10] *Hirose F., Souda Y., Nakano K.* et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2001. V. 48. N 10. P. 2417–2420.
- [11] *Грехов И.В., Белякова Е.И., Костина Л.С., Рожков А.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 23. С. 66–72.

05

## **Стехиометрия, фазовый состав и свойства сверхтвердых наноструктурных пленок Ti–Hf–Si–N, полученные с помощью вакуумно-дугового источника в высокочастотном разряде**

© А.Д. Погребняк, А.П. Шпак, В.М. Береснев, Г.В. Кирик,  
Д.А. Колесников, Ф.Ф. Комаров, П. Конарский, Н.А. Махмудов,  
М.В. Каверин, В.В. Грудницкий

Сумской государственный университет, Сумы, Украина

E-mail: alexp@i.ua

Сумской институт модификации поверхности, Сумы, Украина

E-mail: arogrebnyak@simp.sumy.ua

Институт металлофизики Г.В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина

Харьковский национальный университет, Харьков, Украина

Концерн „Укрросметалл“, Сумы, Украина

Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Теле-радио исследовательский институт, Варшава, Польша

Самаркандский филиал Ташкентского университета информатики,

Самарканд, Узбекистан

Поступило в Редакцию 23 ноября 2011 г.

Получены сверхтвердые наноструктурные покрытия (пленки) на основе Ti–Hf–Si–N с высокими физико-механическими свойствами. С помощью ядерных и атомно-физических методов анализа RBS, SIMS, GT-MS, SEM с EDXS, XRD и наноиндентирования были исследованы элементный, фазовый состав и морфология этих пленок в зависимости от подаваемого на них потенциала смещения на подложку и давления в камере. Обнаружено, что при уменьшении размера нанозерен  $nc\text{-(Ti,Hf)N}$  от 6.7 до 5 nm и формировании  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  (аморфной или квазиаморфной фазы как прослойки между нанозернами) возрастает нанотвердость от 42.7 до 48.4–1.6 GPa, однако дальнейшее уменьшение размера кристаллитов (Ti,Hf)N до 4.0 приводит к незначительному уменьшению твердости. Определена стехиометрия состава пленки, которая изменяется от  $(\text{Ti}_{25}\text{-Hf}_{12.5}\text{-Si}_{12.5})\text{N}_{50}$  до композиции  $(\text{Ti}_{28}\text{-Hf}_{18}\text{-Si}_9)\text{N}_{45}$ , также изменяется значение параметра решетки твердого раствора (Ti,Hf)N.