

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

## ЦЕНТРЫ СПИН-ЗАВИСИМОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В СТРУКТУРАХ, ФОРМИРУЕМЫХ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ АЗОТА В Si

Каранович А. А., Двуреченский А. В., Тыщенко И. Е.,  
Качурин Г. А.

Импантация ионов азота в кремний с целью создания захороненного слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  представляется одним из перспективных методов создания структур кремний-на-изоляторе (КНИ) [1], растущий интерес к которым обусловлен возможностью изготовления на основе этих структур приборов с повышенным быстродействием и радиационной стойкостью и создания трехмерных интегральных схем. Успешное развитие работ в данной области требует четких представлений о дефектности отсеченного слоя Si, качестве границы раздела кремний-изолятор. Дефекты в структурах с захороненным  $\text{Si}_3\text{N}_4$  исследовались, в частности, методом ЭПР [2]. Наблюдавшийся при этом сигнал (изотропная линия с  $g=2.0039 \pm 0.0002$ ) идентифицировался с оборванными связями атомов Si в захороненном аморфном нитриде.

В настоящей работе для исследования дефектов в облученных высокоэнергетическими ионами слоях Si впервые использовался метод спин-зависимой рекомбинации (СЗР) неравновесных носителей [3-5], который по сравнению с обычным ЭПР обладает рядом преимуществ. Во-первых, в отличие от ЭПР, где наблюдаемый сигнал поглощения СВЧ излучения прямо пропорционален числу парамагнитных центров, в СЗР методике интенсивность сигнала (относительное изменение времени жизни неравновесных носителей) определяется изменением поляризации спиновой системы в момент резонанса и при определенных условиях (когда канал рекомбинации через данный центр является доминирующим) не зависит от числа центров рекомбинации. Это позволяет эффективно использовать методику СЗР для тонких имплантированных слоев, в частности в КНИ структурах. Во-вторых, в случае КНИ структур данный метод позволяет наблюдать только те дефекты, которые локализованы в проводящем слое Si.

Исследовались структуры, сформированные имплантацией ионов  $\text{N}^+$  ( $E=135$  кэВ, доза  $5 \cdot 10^{15} \div 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) в пластины кремния *n*- и *p*-типа с ориентацией плоскости {111} или {100}. Облучение проводилось при температурах мишени  $T_i=700 \div 1000$  °С. Имплантированные слои характеризуются *n*-типом проводимости (что обусловлено, по-видимому, проявлением донорных свойств внедренного азота [1]), вследствие чего при использовании в качестве подложки кремния *p*-типа формируется *p-n*-переход. Для проведения контрольных измерений (с целью выяснения роли азота) использовались пластины кремния (ориентации плоскости {100}) *n*-типа, облученные ионами бора ( $E=60$  кэВ,  $\Phi=10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_i=20$ +отжиг 900 °С в течение 2 ч), и кремния *p*-типа, облученного фосфором ( $E=100$  кэВ,  $\Phi=10^{16} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_i=900$  °С).

Спектры спин-зависимой рекомбинации записывались путем регистрации резонансного изменения одной из следующих величин: 1) фотопроводимости [3] (вдоль проводящего слоя Si при подсветке лампой накаливания мощностью 100 Вт); 2) напряжения на *p-n*-переходе при прямом или обратном смещении [4];

3) фотоэда, возникающей на  $p-n$ -переходе при освещении. Измерения проводились в  $X$ -диапазоне СВЧ (частота 9 ГГц, мощность клистрона 250 мВт) с использованием модуляции магнитного поля (35 кГц) или мощности СВЧ излучения (1 кГц) при комнатной температуре; использовались индиевые контакты.

Как показали исследования, форма и интенсивность наблюдаемого сигнала практически не зависят от способа регистрации, а определяются условиями приготовления (температурой и дозой облучения) исследовавшихся образцов. Интенсивность сигналов  $\delta\sigma/\Delta\sigma$ ,  $\Delta V/V$  или  $\Delta\varepsilon/\varepsilon$  ( $\Delta\sigma$  — величина фотопроводимости;  $V$  — напряжение на  $p-n$ -переходе;  $\varepsilon$  — фотоэдс;  $\delta\sigma$ ,  $\Delta V$  и  $\Delta\varepsilon$  — их изменение в момент резонанса) в исследовавшихся образцах лежала в пределах  $(1\div 3)\times 10^{-5}$ .

При температурах облучения  $T_i > 800^\circ\text{C}$  и дозах  $\geq 5\cdot 10^{16}$  см $^{-2}$  наблюдается интенсивный анизотропный спектр (рис. 1). Угловая зависимость положений линий спектра при вращении магнитного поля в плоскости  $\{110\}$  (рис. 2) отвечает дефекту со спином  $s=1/2$  и аксиально симметричным (относительно оси  $\langle 111 \rangle$ )  $\hat{g}$ -тензором с главными значениями  $g_{\parallel} = 2.0010 \pm 0.0005$ ,  $g_{\perp} = 2.0090 \pm 0.0005$ .

При меньших дозах облучения ( $< 10^{16}$  см $^{-2}$ ) или меньших температурах ( $\leq 750^\circ\text{C}$ ) ани-

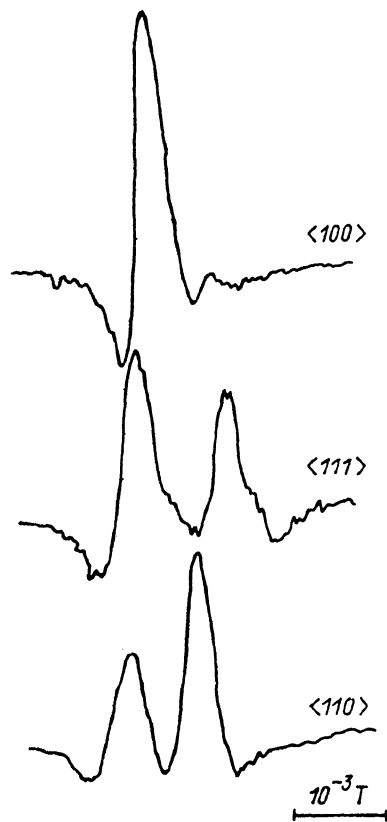


Рис. 1. Спектры спин-зависимой фотопроводимости (вторая производная) в структурах, сформированных имплантацией ионов азота с энергией  $E=135$  кэВ дозой  $5\cdot 10^{16}$  см $^{-2}$  ( $T_i = 850^\circ\text{C}$ , подложка  $p$ -типа с ориентацией плоскости  $\{100\}$ ), при различных ориентациях магнитного поля.

Частота модуляции магнитного поля 35 кГц,  $T=300$  К.

отропный спектр отсутствует, а наблюдается одиночная изотропная линия с  $g$ -фактором, равным  $2.0035 \pm 0.0005$ . По параметрам  $\hat{g}$ -тензора обнаруженный анизотропный дефект совпадает (в пределах ошибки) с дефектами, проявляющимися на границе раздела  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  (дефект  $P_{bO}$  [6]) или  $\text{Si}-\text{Si}_3\text{N}_4$  (дефект  $P_{bN}$  [7]), которые представляют собой оборванную связь трехкоординированного атома кремния  $\text{Si}\equiv\text{Si}$ . В нашем случае подобные дефекты могут быть локализованы либо на границах захороненных включений кристаллического  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , которые образуются при достаточно больших дозах и высоких температурах облучения ( $\Phi > 5\cdot 10^{16}$  см $^{-2}$ ,  $T_i \geq 850^\circ\text{C}$ ) [8], либо на поверхности отсеченного слоя  $\text{Si}$ , покрытого тонким слоем естественного оксида. В последнем случае, однако, спектр  $P_{bO}$  должен был бы присутствовать независимо от типа имплантированной примеси, что не согласуется с экспериментом: в  $p-n$ -переходах, создаваемых имплантацией бора или фосфора, наблюдается лишь одиночная изотропная линия ( $g = 2.0040 \pm 0.0005$ ). Подобный сигнал СЗР наблюдался в кремнии с дислокациями (см., например, [4, 5]) и в нашем случае связан, очевидно, с дислокационными

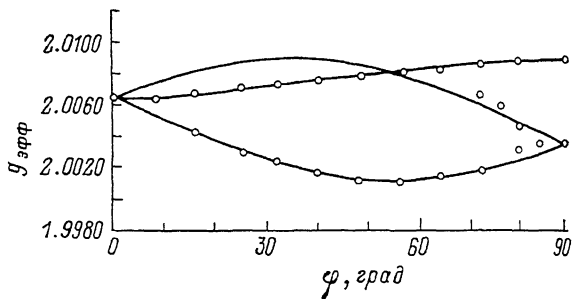


Рис. 2. Угловая зависимость эффективных значений  $g$ -факторов линий спектра при вращении магнитного поля в плоскости  $\{110\}$ .

Точки — эксперимент, линии — расчет.

петлями, присутствующими обычно в имплантированных слоях при аналогичных условиях облучения [9]. Кроме того, при ориентации поверхности {111} электр  $P_{\delta O}$  от границы раздела Si—SiO<sub>2</sub> должен состоять из одной линии [6], поскольку все оборванные связи имеют одинаковую ориентацию, в нашем же случае наблюдается несколько ориентаций дефекта одновременно. Следовательно, наблюдаемый анизотропный сигнал обусловлен, очевидно, дефектами на границе раздела Si—Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, имеющей существенно непланарный характер.

Изотропный сигнал, наблюдавшийся при малых дозах внедренного N<sup>+</sup> ( $< 10^{16}$  см<sup>-2</sup>), так же как и в случае имплантации В<sup>+</sup> и Р<sup>+</sup>, связан, очевидно, с дислокациями. При больших дозах ( $\geq 5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>) и низких температурах ( $T_s \leq 750$  °С) имплантации, когда формируется захороненный слой аморфного нитрида кремния, источником наблюдаемого сигнала могут являться и оборванные связи Si на границе с аморфным нитридом.

Примечательно, что в образцах, облученных большими дозами N<sup>+</sup> ( $10^{18}$  см<sup>-2</sup>) при температурах  $T_s \geq 850$  °С, когда данные электронной дифракции свидетельствуют об аморфной структуре захороненного нитрида кремния, наблюдается анизотропный спектр  $P_{\delta N}$ . Этот результат указывает, очевидно, на наличие включений кристаллического Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> в аморфном захороненном слое, что согласуется с данными работы [10].

Таким образом, применение методики СЗР позволило обнаружить в структурах, сформированных имплантацией ионов азота, два сигнала: 1) изотропный (с  $g = 2.0035 \pm 0.0005$ ), связанный предположительно с дислокациями или оборванными связями Si на границе раздела кремний—аморфный нитрид кремния; 2) анизотропный спектр  $P_{\delta N}$ , отвечающий, очевидно, оборванным связям на трехкоординированных атомах Si, локализованных на границе раздела Si с включениями кристаллического Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

#### Список литературы

- [1] Reeson K. J. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Rev. B. 1987. V. 19/20. P. 269—278.
- [2] Hobbs A., Barklie R. C., Hemment P. L. F., Reeson K. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1986. V. 19. N 32. P. 6433—6439.
- [3] Lepin D. // Phys. Rev. 1972. V. B6. N 2. P. 436—441.
- [4] Борисов Ф. И., Стриха В. И., Третьяк О. В. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 10. С. 1978—1982.
- [5] Solomon I. // Sol. St. Commun. 1976. V. 20. N 3. P. 215—217.
- [6] Poindexter E. H., Caplan P. J., Deal B. E., Razouk R. R. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 9. P. 5847—5854.
- [7] Stesmans A., Van Gorp G. // Phys. Rev. B. 1989. V. 39. N 4. P. 2864—2867.
- [8] Качурин Г. А., Тыщенко И. Е., Попов В. П., Тийс С. А., Плотников А. Е. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 434—437.
- [9] Kachurin G. A., Tyschenko I. E., Fedina L. I. // Proc. 15 Int. Conf. Def. Semicond. Paris, France, 1986. P. 135.
- [10] Kachurin G. A., Tyschenko I. E., Plotnikov F. T., Popov V. P. // 3 Int. Conf. Energy Pulse Part. Beam Mod. Matter. Dresden, GDR, 1989. P. 8.09.

Институт физики полупроводников  
СО АН СССР  
Новосибирск

Получено 15.12.1989  
Принято к печати 20.12.1989

ФТП, том 24, вып. 6, 1990

## ДУАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ХОЛЛА

Добровольский В. Н., Сырых А. Д.

Датчики Холла применяются для измерения индукции магнитного поля, мощности, в качестве гираторов, циркуляторов, смесителей частоты и т. д. [1]. Их конструкция показана на рис. 1. К контактам 1 и 3 на полупроводниковом образце в форме пластины приложено напряжение  $U_1'$  и через них протекает ток  $I_1'$ . Из-за эффекта Холла в магнитном поле на контактах 2 и 4 появляется вы-