

## ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТИРОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ И $\gamma$ -ОБЛУЧЕНИЯ НА УРОВНИ ПЛАТИНЫ В КРЕМНИИ

Лебедев А. А., Султанов Н. А.

При диффузионном легировании платина образует в кремнии акцепторы и доноры с энергиями ионизации  $E_a = E_c - 0.26$  и  $E_d + 0.36$  эВ с сечениями захвата носителей тока  $9.7 \cdot 10^{-15}$  и  $3.8 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup> соответственно. В *n*-Si преобладают акцепторы, в *p*-Si — доноры. Под действием одноосного давления  $E_a$  уменьшается. Изменение  $E_a$  составляет 13—36 мэВ/ГПа в зависимости от ориентации образца. После облучения  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со концентрация уровней Pt незначительно уменьшается (на 20 % при дозе  $7.4 \cdot 10^{18}$  кв/см<sup>2</sup>). Скорость образования радиационных дефектов в Si (Pt) выше, чем в контрольных образцах.

Свойства кремния, легированного платиной, были исследованы рядом авторов [1-8] различными методами. Эти исследования показали, что платина образует эффективные рекомбинационные центры и может быть использована для оптимизации времени жизни неравновесных носителей тока в приборах [8]. Кремний, компенсированный платиной, обладает высокой фоточувствительностью в примесной области спектра. Все это стимулирует продолжение исследований уровней платины в кремнии.

В данной работе приведены результаты измерения нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) в диодах из Si (Pt) до и после облучения  $\gamma$ -квантами и влияния одноосного давления на параметры уровней Pt.

*Образцы и методы измерения.* Легирование кремния марки КЭФ-5, БКЭФ-42 и КДБ-10 производилось диффузионным методом из адсорбированной на поверхности пластин соли PtCl<sub>3</sub>. Диффузия проводилась в окисляющей атмосфере при 850 °С в течение 2—4 ч с последующим охлаждением на воздухе. Диффузия Pt приводила к компенсации кремния обоих типов проводимости, т. е. Pt является амфотерной примесью в Si. Концентрация мелкой примеси практически не изменялась после диффузии Pt. Контрольные образцы проходили те же термообработку и облучение, что и образцы, легированные платиной. Для емкостных измерений были использованы образцы с удельным сопротивлением при 77 К не более 100 Ом·см.

Образцы для пьезоемкостных измерений имели размеры  $6 \times 1 \times 1$  мм с ориентацией наибольшей длины по осям [100], [111] и [110], вдоль которых прикладывалось внешнее давление. На одной из боковых сторон образцов создавались барьеры Шоттки напылением Au или Sb, а на противоположной — омические контакты. Для емкостных измерений использовались также  $p^+$ -*n*- и  $n^+$ -*p*-переходы.

Измерения НЕСГУ производились в интервале времени  $t_1, t_2 = 3t_1$  после начала импульса обратного смещения [9]. Параметры глубоких уровней (ГУ) определялись из температурной зависимости скорости эмиссии носителей тока при изменении  $t_1$  от 0.5 до 500 мс.

Облучение производилось  $\gamma$ -излучением изотопа <sup>60</sup>Со при 300 К и интенсивности потока  $3.4 \cdot 10^{12}$  кв/см<sup>2</sup>·с. Давление осуществлялось с помощью установок, аналогичной приведенной в [10].

*Результаты измерений и обсуждение.* Типичные зависимости НЕСГУ в диодах с *p*-*n*-переходами на основе Si(Pt) приведены на рис. 1. В  $p^+$ -*n*-

переходах при измерении без инжекции в верхней половине запрещенной зоны наблюдается только один пик НЕСГУ (рис. 1, кривая 1). Зависимость  $\lg(\Theta T^2) = f(1/T)$ , где  $\Theta$  — постоянная времени перезарядки ГУ, для этого уровня линейна (рис. 2, прямая 1). Параметры его:  $E_a = 0.26$  эВ, сечение захвата электронов  $\sigma_n = 9.7 \times 10^{-15}$  см<sup>2</sup>. При инжекции амплитуда этого пика практически не изменяется (т. е. для него характерно соотношение  $\sigma_n \gg \sigma_p$ ) и появляется пик с меньшей амплитудой, связанный с уровнем  $E_v + +0.36$  эВ и  $\sigma_p = 3.8 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup> (рис. 1, кривая 2; рис. 2, прямая 3). Для этого уровня  $\sigma_n < \sigma_p$ . В дальнейшем эти уровни обозначаются  $P$

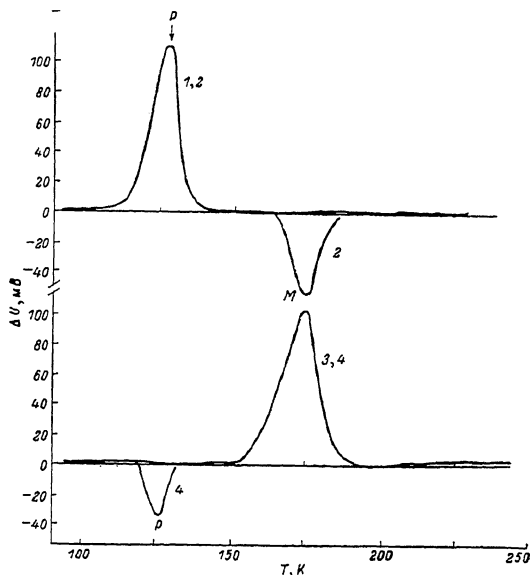


Рис. 1. Зависимости НЕСГУ в  $p$ - $n$ -переходах на основе  $n$ -Si (1, 2) и  $p$ -Si (3, 4), легированного Pt.

1, 3 измерены без инжекции, 2, 4 — с инжекцией,  $t_i = 2$  мс.

и  $M$  соответственно. Ранее аналогичные ГУ, связанные с Pt, наблюдались в работах [3-6].

В  $n^+ - p^+$ -переходах также наблюдаются оба эти уровня с теми же параметрами, но соотношение концентраций у них обратное (рис. 1, кривые 3, 4).

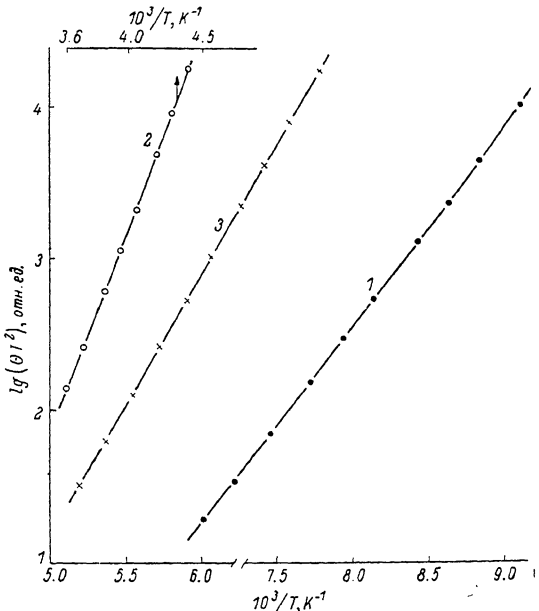


Рис. 2. Зависимости  $\lg(\Theta T^2) = f(10^3/T)$  для обнаруженных ГУ.

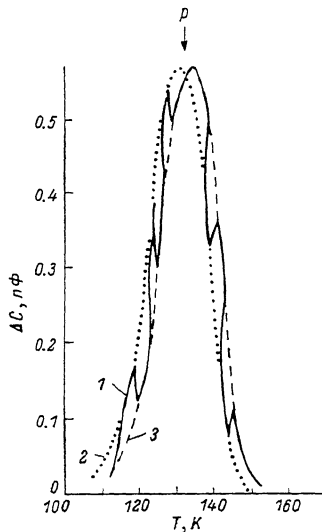


Рис. 3. Типичный вид пика НЕСГУ при периодическом изменении давления.

Зависимости: 1 — экспериментальная, 2, 3 — интерполированные.  $P$ , ГПа: 2 — 0, 3 — 0.3. Уровень  $E_c = 0.26$  эВ, ось [110],  $t_i = 2$  мс.

Исходя из условий компенсации и соотношения сечений захвата носителей тока, можно сделать вывод, что уровень  $P$  является акцептором, а уровень  $M$  — донором. Таким образом, при легировании кремния платиной тип пре-

имущественно образующихся ГУ зависит от типа проводимости исходных кристаллов. Все эти факты показывают, что уровни  $E_c-0.26$  и  $E_v+0.36$  эВ принадлежат разным центрам, связанным с платиной.

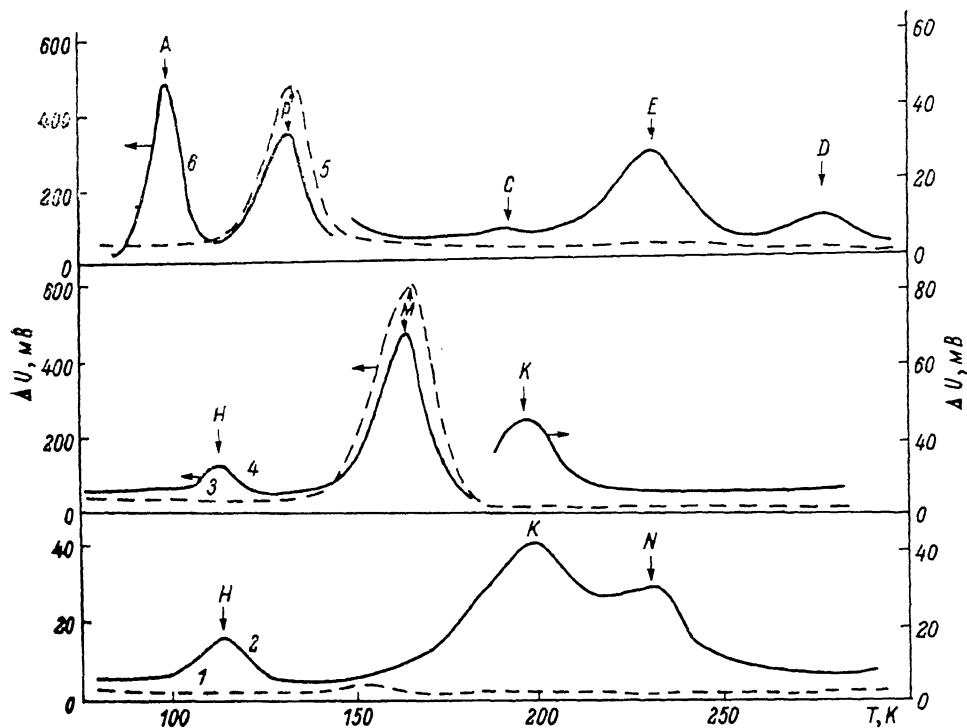


Рис. 4. Зависимости НЕСГУ.

Образцы: 1, 2 — контрольный *p*-Si; 3, 4 — *p*-Si (Pt); 5, 6 — *n*-Si (Pt); 1, 3, 5 — до облучения, 2, 4, 6 — после облучения дозой  $1 \cdot 10^{18}$  кв/см<sup>2</sup>;  $t_1=2$  мс.

В кристаллах *n*-Si наблюдается также уровень  $E_c-0.53$  эВ с  $\sigma_n=4.2 \times 10^{-15}$  см<sup>2</sup> (рис. 2, прямая 2). В диодах Шоттки его концентрация примерно на порядок меньше, чем уровня  $E_c-0.26$  эВ, а в *p-n*-переходах еще меньше. Это связано, вероятно, с тем, что слои с большой концентрацией бора являются геттерами или в их присутствии изменяются условия образования структурных дефектов. Эти ГУ не связаны, по-видимому, с присутствием платины в кремнии.

Изменение  $E_a(P)$  при одноосной деформации  
(в мэВ/ГПа)

Ориентация	Уровни		
	$E_c-0.26$ эВ	$E_c-0.53$ эВ	$E_v+0.36$ эВ
[100]	$-(36.3 \pm 1.3)$	$-(25.5 \pm 2)$	$-(31 \pm 2)$
[110]	$-(49.1 \pm 0.6)$	$-(45.4 \pm 0.6)$	$-(13.6 \pm 1.5)$
[111]	$-(45.9 \pm 1)$	$-(8.3 \pm 1.1)$	$-(21.5 \pm 1.2)$

Сопоставление экспериментально измеренной полуширины пиков НЕСГУ с расчетными значениями показывает, что все три уровня имеют фиксированную энергию ионизации.

Для определения влияния давления на  $E_a$  были измерены зависимости НЕСГУ при одноосном сжатии вдоль основных кристаллографических направлений решетки кремния.

Под действием давления концентрации всех ГУ не изменяются, но соответствующие им пики смещаются по оси  $T$ . Смещения эти невелики, и для более надежного определения величины смещения был использован коммутационный режим измерения: при медленном изменении  $T$  давление  $P$  периодически изменялось от  $P=0$  до  $P$ . На рис. 3 приведена типичная зависимость НЕСГУ для уровня  $E_c-0.26$  эВ в образце с направлением давления вдоль оси [110]. Для остальных кристаллографических направлений и

ГУ изменение пика НЕСГУ под действием одноосной деформации происходит аналогичным образом. В таблице приведены средние значения  $\Delta E_a/\Delta P$  для всех трех ГУ. При вычислении  $\Delta E_a$  предполагалось, что предэкспоненциальный множитель в скорости эмиссии носителей тока с ГУ не зависит от  $P$ . Из таблицы следует, что для исследованных ГУ зависимость  $\Delta E_a = f(P)$  сильнее, чем для ГУ серы [11] и золота [12] в Si.

Спектры НЕСГУ до и после  $\gamma$ -облучения контрольных и легированных платиной образцов  $p$ -Si показаны на рис. 4 (кривые 1—4). Как видно из рисунка, в контрольных диодах после облучения появляются уровни, обозначенные  $H$ ,  $K$  и  $N$ , с  $E_a = 0.20, 0.35$  и  $0.48$  эВ от верха валентной зоны и сечениями захвата дырок  $6 \cdot 10^{-16}, 6 \cdot 10^{-16}$  и  $1.3 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup> соответственно. Уровень  $H$  по своим свойствам близок к дивакансии, уровень  $K$  — к  $K$ -центру [13].

После облучения диодов из  $n$ -Si (Pt) образуются уровни  $A, B, C, E$  и  $D$  с энергиями ионизации (от дна зоны проводимости)  $0.17$  ( $A$ -центр),  $0.23$  (дивакансия),  $0.30, 0.44$  ( $E$ -центр) и  $0.59$  эВ с  $\sigma_n = 3 \cdot 10^{-14}, 2 \cdot 10^{-16}, 4 \cdot 10^{-15}, 4 \cdot 10^{-15}$  и  $3.2 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup> соответственно (рис. 4, кривая 6).

В процессе облучения концентрация уровней Pt монотонно уменьшается со сравнительно малой скоростью: при изменении дозы от  $5 \cdot 10^{16}$  до  $7.4 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup> концентрация уровня  $E_c = 0.26$  эВ падает примерно на 20%. Сравнение зависимостей НЕСГУ в контрольных и легированных Pt диодах показывает, что в Si (Pt) не происходит образования в заметных количествах каких-либо других радиационных дефектов, т. е. при облучении атомы Pt переходят в электрически неактивное состояние без образования устойчивых комплексов с первичными радиационными дефектами.

Концентрации всех радиационных дефектов линейно растут с дозой облучения, однако скорости их образования больше в легированных Pt образцах, чем в контрольных. Особенно четко эта зависимость прослеживается для  $A$ -центра: в контрольных диодах скорость образования  $A$ -центра примерно в 3 раза ниже, чем в диодах на основе  $n$ -Si (Pt). Для остальных центров замечена аналогичная зависимость, но различие в скорости образования не такое значительное. Таким образом, присутствие платины стимулирует генерацию известных радиационных дефектов. Возможно, что в процессе облучения происходит образование неустойчивых комплексов платины с вакансией, при распаде которых легче образуются  $A$ -,  $E$ -центры и другие стабильные дефекты. Возможен и другой вариант: атомы Pt препятствуют непосредственной аннигиляции пар Френкеля, концентрация вакансий возрастает и соответственно возрастает концентрация дефектов, связанных с вакансиями.

## Л и т е р а т у р а

- [1] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М., 1977. 552 с.
- [2] Chen J. W., Milnes A. G. — Ann. Rev. Mat. Sci., 1980, v. 10, p. 157—228.
- [3] Carchano H., Jund C. — J. Sol. St. Electron., 1970, v. 13, N 1, p. 83—87.
- [4] Conti M., Panchieri A. — J. Electron. Soc., 1970, v. 117, N 1, p. 100—103.
- [5] Lisiak K. P., Milnes A. G. — J. Sol. St. Electron., 1975, v. 18, N 2, p. 533—540.
- [6] Лебедев А. А., Соболев Н. А., Урунбаев Б. М. Исследование параметров уровней платины в  $n$ -Si. — ФТП, 1981, т. 15, в. 8, с. 1519—1522.
- [7] Ахмедова М. М., Лебедев А. А., Махкамов Ш. Исследование фотоемкости диодов из Si<Pt>. — ФТП, 1975, т. 9, в. 7, с. 1305—1307.
- [8] Baliga V. J., Sun E. — IEEE Trans. Electron. Dev., 1977, v. 24, N 6, p. 685—688.
- [9] Лебедев А. А., Кузнецов Н. И. Установка для автоматического измерения спектров НЕСГУ. — Препринт ФТИ АН СССР, № 1046. Л., 1986. 25 с.
- [10] Lamp C. D., Farmer J. W., Meese J. M. — Rev. Sci. Instr., 1984, v. 55, N 2, p. 210—212.
- [11] Jantsch W., Wüstel K., Kumagai O., Vogl P. — Phys. Rev. B, 1982, v. 25, N 8, p. 5515—5518.
- [12] Полякова А. Л. Деформация полупроводников в полупроводниковых приборах. М., 1979. 168 с.
- [13] Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1980. 296 с.