

## ЭФФЕКТ ФРЕНКЕЛЯ-ПУЛА НА ЗАРЯЖЕННОЙ ДИСЛОКАЦИИ В Si

С.Г.РЗАЕВ, З.М.ЗАХРАБЕКОВА

*Институт физики НАН Азербайджан*

*AZ 1143, Баку, пр. Джавида, 33*

Из анализа эффекта Френкеля-Пула и термостимулированных токов в р-п переходах с одной заряженной краевой дислокацией определены высота потенциального барьера вблизи дислокации и ее зависимость от внешнего электрического поля. Показано, что заряженная краевая дислокация в кремнии создает глубокие центры кулоновского типа.

Известно, что потенциальный барьер пространственного заряда играет определяющую роль в генерационно-рекомбинационных свойствах дислокации. Построение теоретической модели потенциального барьера вокруг дислокации весьма сложно. В литературе на данный момент имеются некоторые экспериментальные сведения, касающиеся поведения потенциальных барьеров дислокационных комплексов [1], но до сих пор нет какой-либо однозначной информации о свойствах потенциальных барьеров, созданных одной изолированной дислокацией. Изучение поведения потенциальных барьеров, созданных одной изолированной электрически активной дислокацией (ЭАД), представляет большой научный и практический интерес, так как оно может дать очень ценную информацию для построения теоретической модели потенциального барьера пространственного заряда (ПЗ) и электрической активности дислокации.

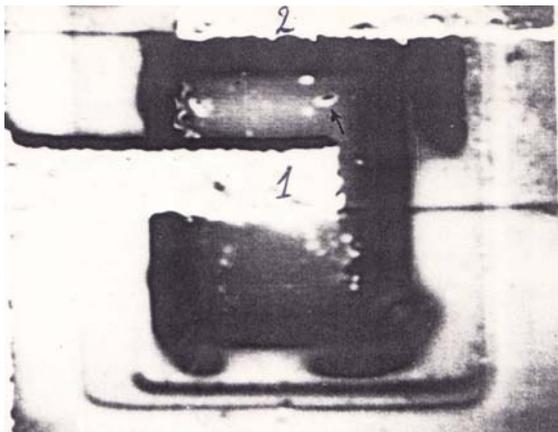
Нами исследовано изменение высоты потенциального барьера ПЗ вблизи одной изолированной краевой заряженной дислокации под воздействием поперечного внешнего электрического поля с целью выяснения зависимости высоты барьера от поля.

Исследования проводились на кремниевых эпитаксиально-планарных  $n^+$ -р переходах интегральных микросхем. Базовая область перехода состоит из легированного бором ( $\approx 5 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ) участка эпитаксиальной пленки (111)-поверхности толщиной  $\sim 2.1 \mu\text{m}$ . Коллекторная область состоит из  $n^+$ -скрытого слоя, сформированного в р-подложке диффузией As ( $\approx 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ) и, примыкающего к нему вертикального слоя, созданного в эпитаксиальной пленке диффузией фосфора ( $\approx 5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ), который выходит на поверхность пленки. Малые площади структур ( $\sim 10^{-6} \text{cm}^2$ ) позволили отобрать образцы, содержащие в р-базовой области одну электрически активную дислокацию.

Для выявления и изучения электрически активных дислокаций применялся комплекс независимых методов [2-6]: анализ ВАХ, ВФХ, просвечивающей и растровой электронной микроскопии (РЭМ), а также методы химического селективного и послойного травления. Избранная методика дает возможность выявлять и проводить исследования электрической активности одной индивидуальной дислокации в отсутствие каких-либо других электрически активных дефектов. Для определения зависимости изменения высоты потенциального барьера от электрического поля, которая может дать ценную информацию об электрических свойствах одной изолированной дислокации, применялся метод термостимулированных токов (ТСТ) [7].

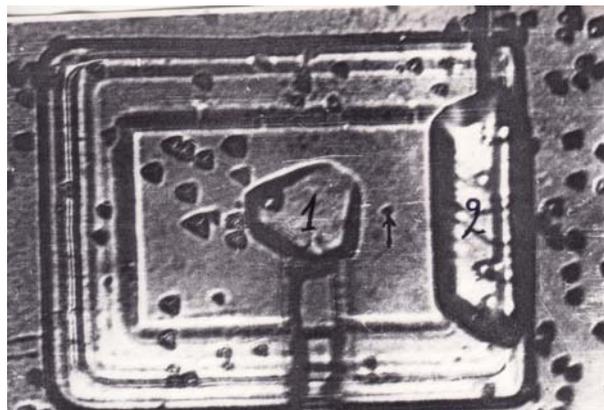
На Рис.1 показана микрофотография исследуемой р-п структуры, полученная на РЭМ в совмещенном режиме вторичных электронов и наведенного тока. На микрофотографии выявлена всего лишь одна генерационно-

рекомбинационная область в виде полого светлого цилиндра (эта область на фотографии имеет несколько эллиптическую форму из-за того, что электронный луч РЭМ падает на поверхность образца под косым углом), локализованная между базовым и коллекторным контактами, т.е. выявлен лишь один электрически активный дефект. Белые пятна над базовой областью представляют собой загрязнения в изолирующем  $\text{SiO}_2$  – слое, которые исчезают после травливания этого слоя. Темное ядро дефекта (полость цилиндра) говорит о том, что оно заряжено положительно и интенсивно поглощает электроны, вследствие чего оно выглядит темным, а светлая область, окружающая ядро, заряжена отрицательно, вследствие чего интенсивность отраженных из этой области электронов высока, поэтому она на микрофотографии выглядит светлой (последнее свидетельствует о донорном типе глубоких центров, создаваемых ядром дислокации).



**Рис.1**

Микрофотография p-n перехода с одним электрически активным дефектом (показано стрелкой): в совмещенном режиме вторичных электронов и на-веденного тока РЭМ.  $E=20\text{кВ}$ ;  $\times 1400$ . 1 и 2 – металлические контакты соответственно к базе и коллектору. Темная область соответствует  $\text{CO}_3$ .



**Рис.2**

Микрофотография p-n перехода после селективного химического травления. 1 и 2 – окна под базовым и коллекторным контактами.

Для определения природы дефекта был применен метод химического селективного травления. На Рис.2 показана микрофотография исследуемой p-n структуры после травления, на которой видны дислокационные ямки травления. Симметричная форма дислокационных ямок травления свидетельствует о том, что выявленные дислокации являются краевыми, в то время как  $30^\circ$ -ным и  $60^\circ$ -ным дислокациям соответствуют асимметричные ямки травления [8,9]. Как видно из Рис.2, под электрически активным дефектом выявлена вторичная (без примесной атмосферы) дислокация, о чем свидетельствует малая величина ямки травления по сравнению с другими ямками травления.

Кривые термостимулированных токов (ТСТ), полученные на p-n переходе лишь с одной электрически активной краевой дислокацией в базовой области, при различных величинах обратного смещения показаны на Рис.3. Пики на кривых ТСТ обусловлены термической эмиссией носителей, захваченных на уровни, созданные дислокацией. Как видно из Рис.3, с ростом поля пик ТСТ смещается по шкале температур в сторону меньших значений и высота его увеличивается. Поскольку пик на кривой ТСТ непосредственно обусловлен эмиссией носителей, захваченных на дислокационные глубокие центры, то его сдвиг на шкале

температур с изменением внешнего электрического поля при заданной скорости нагревания образца указывает на изменение высоты потенциального барьера, который преодолевают носители при эмиссии, т.е. наблюдается эффект Френкеля-Пула (ЭФП) [10]. Величина снижения потенциального барьера  $\Delta\varphi$  определялась как разность значений энергий активации, вычисляемых по положению пика на шкале температур при различных значениях электрического поля (Рис.4).

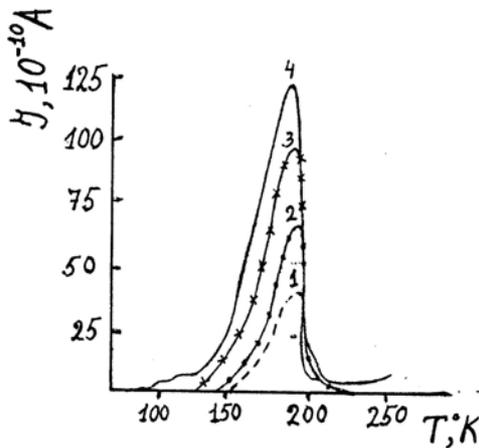


Рис.3.

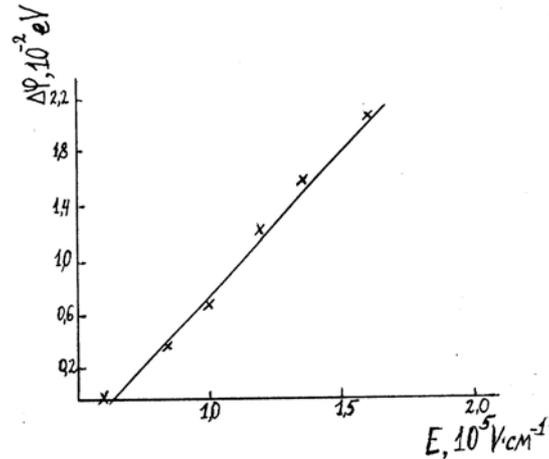


Рис.4.

Термостимулированные токи при различных величинах обратного смещения  $U_R$  на p-n переходе:  $U_R=(0, 2, 3, 4)$ В – для кривых 1-4. Соответствующие величины электрического поля вблизи дислокации– $0,6;1;1,24;1,35)10^5$ В/см. Скорость нагревания образца  $b=0,35$ Кс $^{-1}$ .

Зависимость снижения высоты потенциального барьера от электрического поля.

Обработывая экспериментальные кривые ТСТ с помощью формулы [3],

$$\ln\left(\frac{T_m^4}{b}\right) = \ln\frac{\varphi}{kB} + \frac{\varphi}{kT_m}, \quad (1)$$

где  $T_m$  - температура, соответствующая максимуму ТСТ,  $b$  - скорость нагревания образца,  $k$  - постоянная Больцмана,  $\varphi$  - энергия активации (высота потенциального барьера),  $B$  - коэффициент эмиссии, определили основные параметры глубоких центров. Энергия активации, определенная по наклону прямой из графика зависимости  $\ln(T_m^4/b)$  от  $1/T_m$ , составляет  $\varphi = 0,38$ eV, а коэффициент эмиссии, вычисленный по точке пересечения той же прямой с осью ординат  $B = 5,33 \cdot 10^3$  с $^{-1} \cdot$  К $^{-2}$ .

Как видно из Рис.4, зависимость  $\Delta\varphi(E)$  линейна. Экстраполируя эту зависимость к нулевому значению поля, для  $\varphi_0$  получим величину 0,39eV, которая совпадает с дислокационной энергией  $DH_2$  в p-Si, полученной в [11]. Эти данные свидетельствуют о достоверности полученных результатов.

Экспериментально найденная зависимость  $\Delta\varphi(E)$  позволяет провести идентификацию типа глубоких центров и вид их экранирования. Согласно критериям, приведенным в [12,13], линейная зависимость  $\Delta\varphi(E)$  свидетельствует о кулоновском типе дислокационных центров и статическом характере их

экранирования, в то время как в случае динамического экранирования имеет место зависимость  $\Delta\varphi \approx E^{1/3}$ .

Таким образом, из наблюдений эффекта Френкеля-Пула определена зависимость снижения высоты потенциального барьера вблизи одной заряженной краевой дислокации в кремнии от внешнего поперечного поля. Показано, что эта зависимость имеет линейный характер. Из линейной зависимости следует, что краевые заряженные дислокации в Si создают глубокие центры кулоновского типа.

1. В. Еременко, Б.Я.Фарбер, Е.Б.Якимов, *Физика полупроводников*, №7 (1983) 1313.
2. С.Г.Рзаев, *Неорг. Матер.*, **34** (1998) 1415.
3. M.G.Buehler, *Sol. St. Electron*, **15** (1972) 69.
4. А.Г.Абдуллаев, С.Г.Рзаев, *Микроэлектроника*, **13** (1984) 260.
5. С.Г.Рзаев, *Электронная техника, серия микроэлектроника*, **118** в.3 (1986) 21.
6. D.V.Lang., *J.Appl.Phys.*, **45** (1974) 3014.
7. С.Г.Рзаев, Э.П.Нахмедов, *ФТТ*, **35** (1993) 1083.
8. В.Н.Ерофеев, В.И.Никитенко, В.И.Половицкий, *Кристаллография*, **16** в.1 (1971) 190.
9. A.George, C.Escaragwage, *Phys. St. Sol. (b)*, **53** (1972) 483.
10. Я.И.Френкель, *ЖЭТФ*, **8** (1938) 1292.
11. V.V.Kveder, Y.A.Osipyan, W.Schroter, *G.Zoth, Phys. St Sol. (a)*, **72** (1982) 701.
12. R.M.Hill., *Phyl.Mag.*, **23** (1971) 59.
13. А.И.Губанов, *ЖТФ*, **24** (1954) 308.

#### SİLİSIUMDA YÜKLƏNMİŞ TƏK DİSLOKASIYADA FRENKEL-PUL EFFEKTİ

S. Q. RZAYEV, Z. M. ZÖHRABBƏYOVA

Tək yüklənmiş qraq dislokasiya olan p-n keçiddə termostimullaşmış sərəyanların təhlilindən dislokasiyanın ətrafındakı potensial çəpərin hündürlüyü və onun kənar elektrik sahəsindən asılılığı müəyyən edilmişdir.

Göstərilmişdir ki, yüklənmiş qraq dislokasiya silisiumda kulon tipli dərin səviyyələr yaradır.

#### THE FRENKEL-PUL EFFEKT ON THE CHARGED EDGE DISLOCATION IN Si

S. Q. RZAYEV, Z. M. ZAKHRABEKOVA

The height voltage barrier inside of the charged edge dislocation and the dependence of magnitude of the height voltage barrier on external electrical field were determined by analysis thermo stimulated currents in p-n junction with charged edge dislocation. It was shown that the charged edge dislocation in Si was created deep levels of Coulomb type.

Редактор: Г.Аждаров