

Аномальное рассеяние электронов в облученных протонами кристаллах n -Si

© Т.А. Пагава[¶], Н.И. Майсурадзе

Грузинский технический университет, Республиканский центр структурных исследований (РЦСИ),
0175 Тбилиси, Грузия

(Получена 29 марта 2009 г. Принята к печати 21 апреля 2009 г.)

Цель работы состоит в изучении влияния облучения протонами с энергией 25 МэВ на холловскую подвижность электронов в кристаллах n -Si. Облученные кристаллы с исходной концентрацией электронов $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ исследовались методом Холла в интервале температур 77–300 К. Проведенные исследования показали, что в кристаллах, облученных протонами дозой $\Phi = 8.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, эффективное значение подвижности электронов проводимости μ_{eff} резко увеличивается. Это является прямым доказательством того, что в кристаллах n -Si в этих условиях преимущественно образуются относительно высокопроводящие включения с омическим переходом на границах раздела с матрицей полупроводника. Такими включениями могут быть скопления межузельных атомов или их ассоциатов.

1. Введение

В радиационной технологии твердотельной электроники применяются излучения самой различной природы в широком диапазоне энергий. В частности, облучение протонами высоких энергий монокристаллического и аморфного кремния дает возможность направленно влиять на электрофизические свойства материалов [1–4].

При облучении высокоэнергетическими частицами в объеме полупроводника возникают сложные структурные повреждения, так называемые разупорядоченные области (РО), которые являются причиной специфического изменения электрических и гальваномангнитных свойств. Авторы работы [5] с помощью холловских и фото-холловских измерений изучали влияние облучения протонами с энергиями 30 и 660 МэВ на подвижность основных носителей тока μ_{H} и эффективность введения η различных радиационных дефектов (РД) в кристаллах кремния n - и p -типа проводимости. Выполненные измерения показали, что подвижность μ_{H} и концентрация электронов N уменьшаются с ростом интегрального потока протонов Φ . Инфракрасная (ИК) подсветка или изохронный отжиг облученных образцов приводят к увеличению μ_{H} и N , что объясняется ионизацией и отжигом вторичных РД в периферийной части областей скопления дефектов (ОСД).

В работе [6] изучались эффективность введения η и природа РД, образующихся в n -Si при облучении протонами с энергией 640 МэВ при различных температурах ($T_{\text{ит}} = 30\text{--}700^\circ\text{C}$).

Увеличение $T_{\text{ит}}$ приводит к увеличению μ_{H} , что объясняется уменьшением η для вторичных РД в периферийной части ОСД, и соответственно к уменьшению размеров этих скоплений.

Полученные в работах [5,6] результаты дополняют друг друга. Анализ экспериментальных данных позволил авторам этих работ сделать предположение, что ОСД

состоят из двух частей: центральной (ядра) и периферийной (оболочки). Ядра ОСД состоят из собственных дефектов структуры (вакансионных или межузельных ассоциатов), а периферийную часть ОСД создают комплексы собственных дефектов с примесными атомами, т.е. вторичные РД (E -центры, A -центры, кислород + дивакансия и т.д.).

Если бы авторам работ [5,6] с помощью ИК подсветки, увеличения температур изохронного отжига, T_{ann} , или облучения, $T_{\text{ит}}$, удалось полностью освободить ядра ОСД от влияния примесно-дефектной оболочки, температурная зависимость подвижности $\mu_{\text{H}}(T)$ сместилась бы вверх, в сторону высоких значений μ_{H} . Для этого необходимо, чтобы ядра ОСД в самом деле являлись скоплениями межузельных атомов или их ассоциатов и не отжигались раньше вторичных РД в оболочке (температура отжига $T_{\text{ann}} \geq 600^\circ\text{C}$).

Когда в кристалле существуют макроскопические включения, не прозрачные для электронов проводимости (диэлектрические включения), можно ожидать уменьшения эффективного значения подвижности основных носителей тока μ_{eff} за счет уменьшения фактического объема образца [7].

В другом предельном случае, когда можно пренебречь проводимостью среды по сравнению с проводимостью включений (металлические включения), μ_{eff} является возрастающей функцией объемной доли f этих включений.

Диэлектрические включения являются дефектами вакансионного, а металлические — дефектами межузельного типа [7,8].

Радиационные дефекты вакансионного и межузельного типов в кристаллах кремния взаимодействуют между собой. Термообработка при температуре 200–300°C приводит к удалению всех вакансионных комплексов. По мнению авторов работы [9], это происходит за счет распада межузельных комплексов и аннигиляции их с вакансионными дефектами.

[¶] E-mail: tpagava@gtu.ge

Эффективность введения и природа РД в кристаллах кремния в основном определяются примесным составом и энергией облучения [10].

Цель данной работы — изучение влияния протонного облучения с энергией 25 МэВ на природу РД в кристаллах *n*-Si.

2. Техника эксперимента

Исследовались образцы *n*-Si, полученные методом зонной плавки, с концентрацией фосфора $N_P = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, концентрацией кислорода $N_O \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; плотность ростовых дислокаций не превышала $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-2}$. Исследуемые образцы размерами $1 \times 3 \times 10 \text{ мм}$ облучались протонами с энергией 25 МэВ. Плотность потока протонов составляла $\varphi = 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Облученные образцы отжигались при температуре $T_{\text{анн}} = 90^\circ \text{C}$, время отжига составляло 10 мин. Концентрация электронов N , коэффициент Холла R и удельная проводимость σ измерялись в интервале температур $T = 77 - 300 \text{ К}$. Холловская подвижность электронов вычислялась по формуле $\mu_H = \sigma R$. В сильно компенсированных образцах энергии уровней дефектов ΔE определялись по наклону зависимости $N = f(10^3/T)$ в логарифмических координатах. Ошибка определения этих величин не превышала 10%.

3. Результаты

В исходных образцах зависимость $N = f(10^3/T)$ в области $T = 77 - 300 \text{ К}$ соответствует полной ионизации мелких доноров — атомов фосфора: $N = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} = \text{const}$ (рис. 1, кривая 1). После облучения протонами дозой $\Phi = 8.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ температурная зависимость концентрации электронов соответствует истощению акцепторных центров с энергией $E_c - 0.38 \text{ эВ}$ (рис. 1, кривая 2). В этом же образце после отжига при 90°C и старения в течение 30 суток при 300 К на зависимости $N = f(10^3/T)$ наблюдается прямолинейный участок, соответствующий истощению акцепторных центров с энергией $E_c - 0.13 \text{ эВ}$ (рис. 1, кривая 3). На рис. 2 представлены соответствующие температурные зависимости холловской подвижности электронов в исходном и облученном протонами кристаллах (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

На рис. 2 кривая 1 соответствует рассеянию электронов на фонах в исходном кристалле. Кривые 2 и 3 на рис. 2 представляют собой зависимости $\mu_H(T)$ в образцах, облученных дозой $\Phi = 8.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Сразу после облучения холловская подвижность заметно выше, чем в исходном образце (ср. кривые 1 и 2), и резко увеличивается с понижением температуры. После низкотемпературной обработки при 90°C и старения образца в течение 30 суток при 300 К кривая $\mu_H(T)$ проходит ниже, чем в исходном кристалле, и с понижением температуры резко уменьшается (кривая 3).

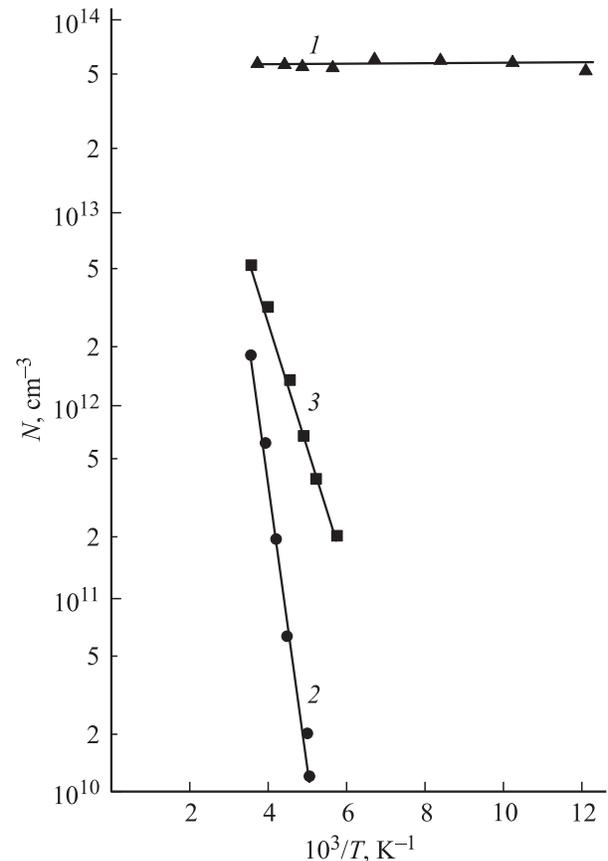


Рис. 1. Зависимость концентрации электронов от температуры в кристаллах *n*-Si до (1) и после облучения протонами с энергией 25 МэВ, дозой $\Phi = 8.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (2, 3). 2 — сразу после облучения, 3 — после отжига при 90°C и старения образца в течение 30 суток при 300 К.

4. Обсуждение результатов

Температурная зависимость холловской подвижности электронов исходного образца свидетельствует о том, что в диапазоне температур $77 - 300 \text{ К}$ доминирует фоновый механизм рассеяния носителей тока. Поэтому смещение зависимости $\mu_H(T)$ вверх или вниз после облучения нельзя объяснить изменением концентрации тех или иных рассеивающих дефектов в кристалле. Высокие значения подвижности, получаемые в холловских экспериментах, являются признаком образования в образце относительно высокопроводящих включений с омическим переходом на границах раздела с матрицей полупроводника. Если высокопроводящие включения имеют сферическую форму, то эффективная подвижность есть

$$\mu_{\text{eff}} \approx \mu_H \frac{1 + 3f}{1 - 6f}, \quad (1)$$

где μ_H — холловская подвижность в матрице, f — суммарная объемная доля скоплений межузельных атомов [8]. Если в качестве параметра μ_H использовать значение холловской подвижности в исходном материале,

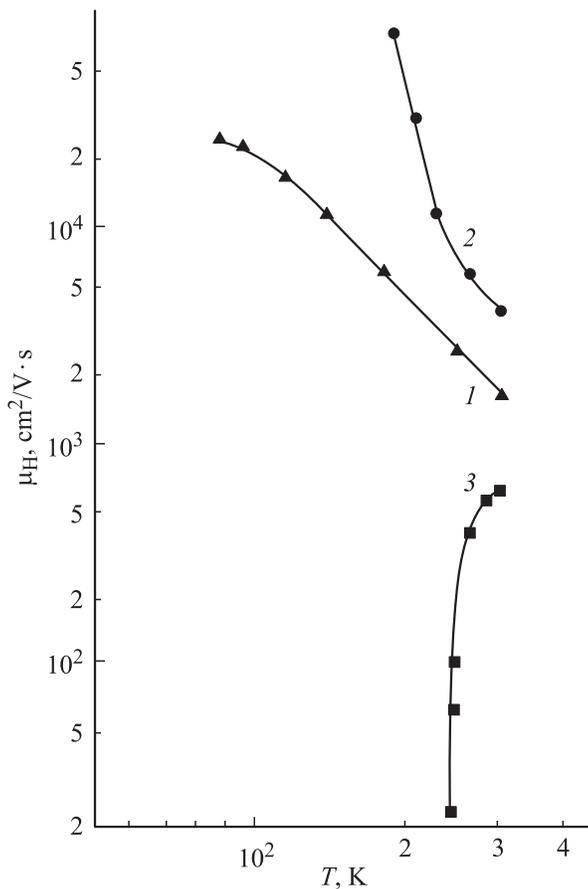


Рис. 2. Зависимость холловской подвижности электронов от температуры в кристаллах до (1) и после облучения протонами с энергией 25 МэВ, дозой $\Phi = 8.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (2, 3). 2 — сразу после облучения, 3 — после отжига при 90°C и старения образца в течение 30 суток при 300 К.

примерно составляющее $1.4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, а измеренное после облучения значение холловской подвижности при комнатной температуре, составляющее примерно $4.4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, в качестве параметра μ_{eff} , получаем $f \approx 0.1$.

Полученное значение f является разумной оценкой суммарной объемной доли скоплений межузельных атомов, характерных для реальной структуры кремния при облучении легкими ионами [11].

Разупорядоченные области вакансионного типа, которые в небольшом количестве несомненно присутствуют в исследуемых нами образцах, состоят из насыщенного мультивакансионными комплексами ядра и оболочки, содержащей комплексы моновакансий с примесными атомами. Оболочки РО формируются при диффузии моновакансий ядра в матрицу и при взаимодействии их с примесными атомами. Глубина проникновения моновакансий в матрицу, а следовательно, и размеры оболочек ОР определяются концентрацией примесей в матрице [12]. В нашем эксперименте для увеличения глубины проникновения моновакансий в матрицу

за пределами оболочки облученные образцы подвергались термообработке. Температура термообработки ($T_{\text{ann}} = 90^\circ\text{C}$) лимитировалась температурой начала отжига E -центров и РО — 100 и 200°C соответственно [13]. В процессах термообработки и старения облученных образцов при 300 К, по-видимому, моновакансии выходят за пределы оболочки РО и устремляются к скоплениям межузельных атомов, которые, подобно дислокациям в кристаллической решетке, вокруг себя создают упругие напряжения. Вакансии вступают в квазихимическую реакцию с примесными атомами, которые находятся вокруг скоплений межузельных атомов, и вокруг этих скоплений образуются экранирующие их примесно-дефектные оболочки, состоящие из A -центров, E -центров, дивакансий и других РД акцепторного типа, а также атомов легирующей (фосфор) и фоновых (кислород, углерод) примесей. Определенная часть вакансий претерпевает аннигиляцию с межузельными атомами металлических включений.

При температурах комнатной и ниже большинство РД акцепторного типа в кристаллах n -Si заряжены отрицательно. Следовательно, скопления межузельных атомов становятся непрозрачными для электронов проводимости и вместе с вакансионными скоплениями играют роль диэлектрических включений. Поэтому в эксперименте наблюдается уменьшение эффективного значения подвижности основных носителей тока после старения облученных образцов (рис. 2, кривая 3).

Резкое уменьшение подвижности с минимумом на кривой зависимости $\mu_{\text{eff}}(T)$ наблюдалось также в пластически деформированных и облученных сначала протонами с энергией 25 МэВ, а потом электронами с энергией 2.2 МэВ кристаллах n -Si в работе [14]. ИК подсветка уменьшает глубину минимума. Наблюдаемый эффект в работе объясняется сосредоточением вторичных точечных дефектов на дислокациях и РД в процессах изохронного отжига, облучения электронами и естественного старения исследуемых образцов.

Для оценки объемной доли квазидиэлектрических включений f_1 в грубом приближении по аналогии с формулой (1) можно использовать выражение

$$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_{\text{H}}} \approx \frac{1 - f_1}{1 + f_1}. \quad (2)$$

Подставляя экспериментальные значения μ_{eff} и μ_{H} ($7 \cdot 10^2$ и $1.4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ соответственно), получаем $f_1 \approx 0.3$ при 300 К.

Полученные значения f_1 больше значений f , так как квазидиэлектрические включения образуются на базе скоплений межузельных атомов.

С понижением температуры образца растет концентрация заряженных РД в примесно-дефектной оболочке квазидиэлектрических включений. Это приводит к увеличению степени экранирования этих включений и, следовательно, к наблюдаемому уменьшению μ_{eff} с понижением температуры (рис. 2, кривая 3).

При температуре 240 К $\mu_{\text{H}} = 2 \cdot 10^1 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; следовательно, $f_1 \approx 0.9$. При дальнейшем уменьшении температуры резко возрастает сопротивление образца и проведение электрических измерений становится невозможным.

Исходя из вышеизложенного можно предположить, что в образцах кремния в процессе облучения высокоэнергетическими частицами, кроме РО вакансионного типа, образуются также скопления межузельных атомов. Они по-разному влияют на эффективное значение холловской подвижности основных носителей тока μ_{eff} . РО вакансионного типа (диэлектрические включения) вызывают уменьшение, а скопления межузельных атомов (металлические включения) — увеличение μ_{eff} . Величина и вид температурной зависимости μ_{eff} зависят от количественного соотношения этих скоплений. В процессе облучения протонами с энергией 25 МэВ в кристаллах *n*-Si преимущественно образуются скопления межузельных атомов, что приводит к увеличению μ_{eff} . В процессе естественного старения вокруг металлических включений образуются непрозрачные для электронов проводимости отрицательно заряженные оболочки, что приводит к уменьшению μ_{eff} .

На рис. 1 кривая 2 соответствует истощению *E*-центров или дивакансий ($E_c - 0.38 \text{ эВ}$), а кривая 3 — истощению *A*-центров ($E_c - 0.13 \text{ эВ}$), энергия деионизации которых изменена в силу электростатического взаимодействия между отрицательно заряженными центрами в примесно-дефектной оболочке, образующихся вокруг РО в процессе естественного старения облученных образцов при 300 К [14].

5. Заключение

Таким образом, в кристаллах *n*-Si после облучения протонами с энергией 25 МэВ наблюдается резкое увеличение μ_{eff} — эффективного значения подвижности основных носителей тока. Это является прямым доказательством того, что в этих условиях в исследуемых образцах преимущественно образуются металлические включения. Предположительно, металлические включения являются скоплением межузельных атомов или их ассоциатов.

Предположительно, в процессе отжига ($T_{\text{ann}} = 90^\circ\text{C}$) и естественного старения облученных образцов в течение 30 суток при 300 К вокруг металлических включений образуются непрозрачные для электронов проводимости отрицательно заряженные примесно-дефектные оболочки, что приводит к резкому уменьшению эффективного значения подвижности электронов μ_{eff} .

По-видимому, преимущественное образование диэлектрических или металлических включений зависит от энергии и типа налетающих на кристалл частиц.

Список литературы

- [1] И. Броудай, Дж. Мерей. *Физические основы микротехнологии*, пер. с англ. под ред. А.В. Шальнова (М., Мир, 1985).
- [2] В.С. Вавилов, Б.Н. Горин, Н.С. Данилин. *Радиационные методы в твердотельной электронике* (М., Радио и связь, 1990).
- [3] В.В. Козловский, В.А. Козлов, В.Н. Ломасов. *ФТП*, **34**, 129 (2000).
- [4] В.А. Козлов, В.В. Козловский. *ФТП*, **35**, 769 (2001).
- [5] В.И. Кузнецов, П.Ф. Лугаков. *ФТП*, **13**, 625 (1979).
- [6] В.И. Кузнецов, П.Ф. Лугаков. *ФТП*, **14**, 1924 (1980).
- [7] Р.Ф. Коноплева, В.Л. Литвинов, Н.А. Ухин. *Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий* (М., Атомиздат, 1971).
- [8] Е.В. Кучис. *Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования* (М., Радио и связь, 1990).
- [9] И.В. Антонова, С.С. Шаймеев, С.А. Смагулова. *ФТП*, **40**, 557 (2006).
- [10] Р.Ф. Коноплева, В.И. Остроумов. *Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с кремнием* (М., Атомиздат, 1975).
- [11] А.Л. Асеев, Л.И. Федина, Д. Хезль, Х. Барч. *Скопления междоузельных атомов в кремнии и германии* (Новосибирск, Наука, 1991).
- [12] Н.А. Ухин. *ФТП*, **6**, 831 (1972).
- [13] *Физические процессы в облученных полупроводниках*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, Наука, 1977).
- [14] Л.С. Милевский, Т.М. Ткачева, Т.А. Пагава. *ЖЭТФ*, **69**, 2132 (1975).

Редактор Л.В. Шаронова

Anomalous scattering of electrons in *n*-Si crystals irradiated with protons

T.A. Pagava, N.I. Maisuradze

Georgian Technical University,
Republican Center of Structural Studies (RCSS),
0175 Tbilisi, Georgia