

Аномально большое время жизни дырок в кремнии с нанокластерами атомов марганца

© М.К. Бахадырханов[¶], С.Б. Исамов, Х.М. Илиев, Х.У. Камалов

Ташкентский государственный технический университет,
100095 Ташкент, Узбекистан

(Получена 9 февраля 2015 г. Принята к печати 13 марта 2015 г.)

Показана возможность существенного увеличения времени жизни дырок ($\tau \approx 10^3$ с) в кремнии с многозарядными нанокластерами атомов марганца. Установлено, что длительное время жизни дырок ($\tau \approx 10^0 - 10^3$ с) практически сохраняется вплоть до $T = 250$ К. Такие материалы могут быть использованы в разработке более эффективных фотоэлементов и фотоприемников ИК излучения.

Как известно, время жизни носителей тока в полупроводниках в основном определяется параметрами рекомбинационных центров [1–3]. Проблема получения достаточно малого времени жизни в основном решается легированием кремния атомами золота или с помощью радиационной технологии, позволяя достичь показателей $\tau \approx 10^{10} - 10^{11}$ с [4–6]. Для повышения времени жизни носителей тока в решетку кремния вводятся примесные атомы, которые создают очувствляющие центры. Например, для повышения времени жизни электронов кремний легируется Zn, а для повышения времени жизни дырок соответственно Mn, S, Se [7,8] и т.д. При этом удается получить $\tau \approx 10^{-4} - 10^{-5}$ с.

Получение более длительных показателей времени жизни представляет большой интерес с точки зрения использования таких материалов для разработки более эффективных фотоэлементов с достаточно глубокими $p-n$ -переходами, а также более высокочувствительных ИК датчиков для областей длин волн 1.5–8 мкм. Однако следует отметить, что в настоящее время гигантское время жизни ($\tau \approx 10^3$ с) было получено на основе легированных сверхрешеток, а также в кремнии с примесными центрами [9–12]. В данной работе представлены новые экспериментальные результаты по времени жизни носителей заряда в кремнии с многозарядными центрами.

При определенных технологических условиях легирования в полупроводниках могут формироваться кластеры примесных атомов [13]. Как показано в работах [14,15], в кремнии атомы марганца создают точечные центры из четырех атомов. Авторами работ [16] показано, что в кремнии создаются нанокластеры, которые состоят из четырех атомов марганца, расположенных в эквивалентных межузельных положениях вокруг отрицательно заряженного атома бора. Одним из основных условий формирования таких кластеров является нахождение атомов марганца в состояниях Mn^+ , Mn^{++} , которые обеспечивают многозарядность кластеров [17]. Поэтому такие центры должны существенно влиять на рекомбинационные параметры материала. Авторами в качестве исходного кремния был использован

монокристаллический кремний p -типа с $\rho \sim 5 \Omega \cdot \text{см}$. Образцы легировались по технологии [18], т.е. при таких технологических условиях, что после диффузии они становились компенсированными образцами с p -типом проводимости с удельным сопротивлением $\rho \approx (2-8) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{см}$ при комнатной температуре. Как показало исследование образцов методом эффекта Холла, в них концентрация некомпенсированных дырок составляет $p \approx (2-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, а положение уровня Ферми $F = E_V + 0.35 \text{ эВ}$. Если учесть, что атомы марганца в кремнии создают два донорных энергетических уровня $E_1 = E_C - 0.27$ и $E_2 = E_C - 0.5 \text{ эВ}$ [19], то в исследуемых образцах все атомы марганца находятся в состоянии Mn^{++} , и нанокластеры имеют структуру $[(Mn)_4^{+8} B^{-1}]^{+7}$, действующую как многозарядный центр.

Время жизни носителей заряда исследовалось методом затухания фотопроводимости с использованием прямоугольных световых импульсов различной длительности на установке ИКС-21, в области примесного света $h\nu = 0.16 - 0.4 \text{ эВ}$. Такие исследования позволяют более точно определить влияние многозарядного центра на величину времени жизни носителей тока. Как показали экспериментальные результаты, при световых импульсах с длительностью $\tau \approx 10^{-4} - 10^0$ с практически нет насыщения фотопроводимости ФП, т.е. наблюдается долговременная релаксация нарастания тока.

Поэтому авторами были использованы световые импульсы с достаточно большой длительностью. Как показали результаты исследования релаксации, ФП имеет аномально длительный характер, свидетельствующий о гигантском времени жизни дырок в таких материалах (рис. 1, кривая 1). Как видно из результатов эксперимента, после выключения света, значение фототока практически остается без существенного изменения достаточно долгое время, т.е. как будто бы отсутствует процесс рекомбинации. Расчет на основе полученных данных показывает, что время жизни дырок в таких материалах при $T = 100$ К составляет $\tau = 10^2 - 10^3$ с, т.е. действительно имеет место гигантское большое время жизни дырок. Эти данные свидетельствуют о том, что кластеры атомов марганца действуют как многозарядные центры в решетке кремния. Следует отметить, что полученные данные имеют место при освещении

[¶] E-mail: sobir-i@mail.ru

образца ИК светом $h\nu = 0.16-0.4$ эВ. Эти данные еще раз могут послужить подтверждением того, что в этом случае работают только энергетические уровни кластера, обладающие аномально маленькими сечениями захвата дырок. Результаты исследования релаксации ФП при различных температурах показали, что в интервале температур $T = 77-130$ К релаксация ФП практически не меняется, т.е. она имеет долговременный характер, а начиная с $T > 130$ К, релаксация ФП происходит достаточно быстро (рис. 2, кривые 2,3). Эти данные свидетельствует об уменьшении времени жизни дырок. На основе полученных экспериментальных данных нами

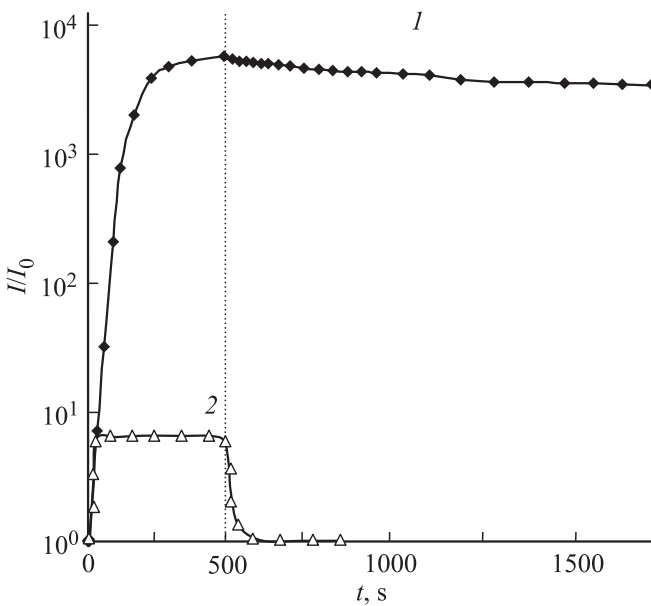


Рис. 1. Нарастание фототока при освещении образцов импульсами примесного света: 1 — $h\nu = 0.2$ эВ, p -тип, 2 — n -тип, и остаточная фотопроводимость при прекращении импульсов.

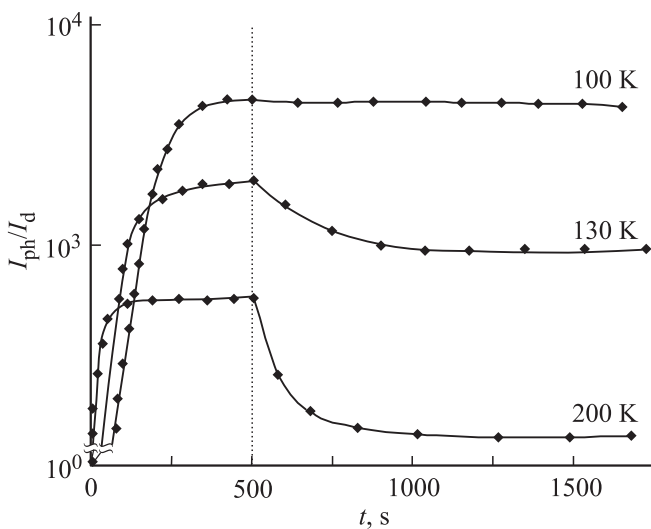


Рис. 2. Релаксация фотопроводимости при различных температурах.

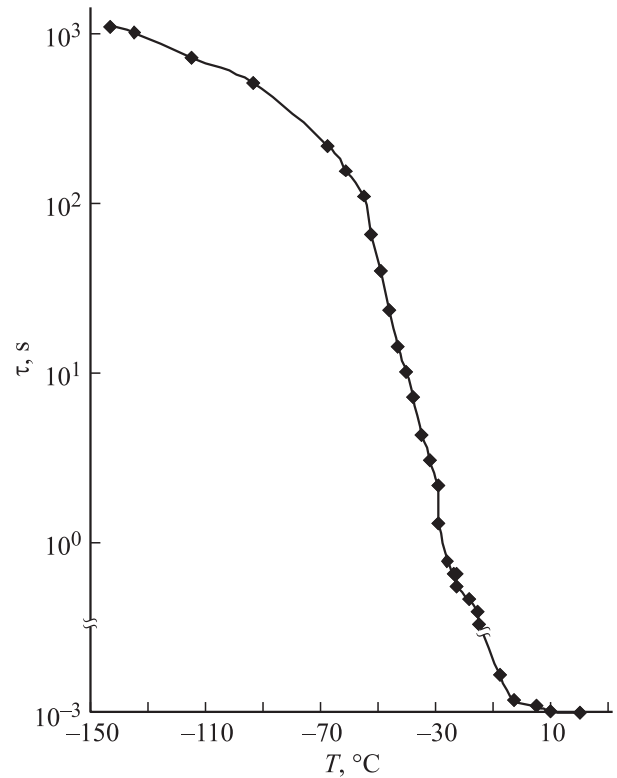


Рис. 3. Зависимость времени жизни носителей заряда от температуры в образцах кремния с многократно заряженными центрами.

рассчитано время жизни дырок в интервале температур $T = 77-300$ К (рис. 3). Как видно, даже при более высоких температурах $T \approx 300$ К время жизни дырок остается достаточно высоким. На рис. 1 (кривая 2) представлена кривая релаксации ФП в перекомпенсированных образцах кремния, легированного марганцем $n\text{-Si}(B, Mn)$, в которых атомы марганца не образуют кластеры и находятся в атомарном состоянии Mn^0, Mn^+, Mn^{++} [20]. Результаты эксперимента показали, что в таких образцах в области $h\nu = 0.16-0.4$ эВ фотоответ не наблюдается. Поэтому такие образцы освещались световыми импульсами с энергией $h\nu = 0.5-1.1$ эВ. Как видно, в этом случае релаксация ФП имеет аналогично предположить, что начало фотоответа в области $h\nu = 0.16-0.4$ эВ и долговременный характер релаксации ФП в основном связаны с многозарядными нанокластерами атомов марганца.

Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены следующим образом: многозарядные кластеры атомов марганца создают ряд глубоких донорных уровней, находящихся около валентной зоны в интервале $E_V + (0.16-0.4)$ эВ. При освещении образцов фотонами с энергией $h\nu = 0.16$ эВ, электроны переходят из валентной зоны на энергетические уровни кластера. Поскольку кластер находится в многократно положительно заряженном состоянии, эти захваченные

электроны не могут рекомбинировать с дырками, которые находятся в потенциальных ямах, образованных между кластерами. Это обеспечивает гигантское время жизни дырок и аномально маленькое время жизни для электронов.

Таким образом, в кремнии с многозарядными нанокластерами атомов марганца время жизни дырок достигает аномально большого значения и даже большего, чем в сверхрешетках. Такие материалы обладают значительной примесной ФП в области $h\nu = 0.16-0.8$ эВ, что позволяет создавать высокочувствительные фотоприемники для области $\lambda = 1.55-8$ мкм.

Список литературы

- [1] В.Я. Алешкин, В.И. Гавриленко, Д.М. Гапонова, А.В. Иконников, К.В. Маремьянин, С.В. Морозов, Ю.Г. Садофьев, S.R. Johanson, Y.H. Zhang. ФТП, **39** (1), 30 (2005).
- [2] Л. Роуз., под ред. С.М. Рывкина. *Основы теории фотопроводимости* (М., Мир, 1966).
- [3] О.А. Шегай, А.К. Бакаров, А.К. Калагин, А.И. Торопов. ФТПб **39** (1), 115 (2005).
- [4] W.M. Bullis. Sol. St. Electron., **9**, 143 (1966).
- [5] М.К. Бахадырханов, С. Зайнабидинов. ФТП, **2**, (10), 2051 (1977).
- [6] А.Д. Кирюхин, В.В. Григорьев, А.В. Зуев, В.В. Зуев, Н.А. Королев. ФТП, **41** (3), 269 (2007).
- [7] Б.В. Корнилов. ФТТ, **5** (11), 3305 (1963).
- [8] А.А. Таскин. ФТП, **36** (10), 1163 (2002).
- [9] В.Н. Лозовский, Г.С. Константинова, С.В. Лозовский. *Нанотехнология в электронике. Введение в специальность: Учеб. пособие. 2-е изд.* (СПб., Лань, 2008).
- [10] N.T. Bagraev, V.A. Mashkov, D.S. Poloskin. Sol. St. Commun., **55** (9), 791 (1985).
- [11] N.T. Bagraev. Semicond. Sci. Technol., **9**, 61 (1994).
- [12] N.T. Bagraev. Sol. St. Commun., **95** (6), 365 (1995).
- [13] М.Г. Мильвидский, В.В. Чалдышев. ФТП, **32** (5), 513 (1998).
- [14] G.W. Ludwig, H.H. Woodbury, R.O. Carlson. Phys. Chem. Solids, **8**, 490 (1959).
- [15] J. Kreissl, W. Gehlhoff. Phys. Status Solidi B, **145**, 609 (1988); Sol. St. Phenomena, **32-33**, 213 (1993).
- [16] М.К. Бахадырханов, К.С. Аюпов, Г.Х. Мавлянов, С.Б. Исамов. ФТП, **44** (9), 1181 (2010).
- [17] М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов, С.Б. Исамов, Х.М. Илиев, К.С. Аюпов, З.М. Сапарниязова, С.А. Тачилин. Неорг. матер., **47** (5), 545 (2011).
- [18] Б.А. Абдурахманов, К.С. Аюпов, М.К. Бахадырханов, Х.М. Илиев, Д.Т. Бобонов, Н.Ф. Зикриллаев, З.М. Сапарниязова, А. Тошев. ДАН РУз., № 4, 32 (2010).
- [19] В.И. Фистуль, В.М. Казакова, Ю.А. Бобриков, А.В. Рябцев, К.П. Абдурахманов, С. Зайнабидинов, Т.С. Камилов, Ш.Б. Утамурадова. ФТП, **16** (5), 939 (1982).
- [20] М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов, С.Б. Исамов, К.С. Аюпов, Х.М. Илиев, О.Э. Сагтаров, С.А. Тачилин. Электрон. обраб. материалов, вып. 3., 94 (2010).

Редактор Т.А. Полянская