

Краткие сообщения

07

ИК фотоприемники, работающие при наличии фонового освещения

© М.К. Бахадырханов, С.Б. Исамов

Ташкентский государственный технический университет,
100095 Ташкент, Узбекистан
e-mail: sobir-i@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 8 октября 2014 г. В окончательной редакции 28 августа 2015 г.)

Исследована спектральная зависимость фотопроводимости кремния с многозарядными нанокластерами атомов марганца при различных значениях фонового тока. Определена спектральная область существования инфракрасного гашения фотопроводимости и смещения энергии фотона, при которых наблюдается максимум гашения в зависимости от значения фонового тока. Полученные результаты дают возможность создания фотоприемников слабого ИК света в области $h\nu = 0.4\text{--}0.8\text{ eV}$ при наличии достаточно высоких уровней фонового фототока.

Эффект инфракрасного гашения фотопроводимости (ИКГФП) обнаружен в ряде полупроводниковых материалов [1–5] и в основном объясняется перезарядкой очувствляющих центров. Возможность обнаружения ИКГФП в широком интервале фонового света представляет большой научный и практический интерес с точки зрения создания фотоприемников слабого ИК света при наличии достаточно высокого уровня фонового освещения. Однако, как показывает анализ результатов, в этом плане эффект ИКГФП, связанный с очувствляющими центрами с дискретными энергетическими уровнями, не позволяет решить выше указанную проблему.

Поэтому представляет интерес исследование ИКГФП в кремнии с многозарядными нанокластерами атомов марганца.

Как показано в работах [6–8], при определенных условиях легирования кремния могут образовываться кластеры, состоящие из четырех атомов марганца, находящихся в соседних междоузельных положениях вокруг отрицательно заряженного атома бора. Особенность таких кластеров заключается в том, что они в зависимости от концентрации атомов бора и марганца могут находиться в различных зарядовых состояниях $[(\text{Mn})_4^{+4}\text{B}^{-1}]^{+3} - [(\text{Mn})_4^{+8}\text{B}^{-1}]^{+7}$ [9]. Поэтому представляет интерес исследование ИКГФП в кремнии с нанокластерами с максимальным зарядовым состоянием. Для получения таких материалов нами в качестве исходного материала был использован монокристаллический кремний КДБ-3 с концентрацией дырок $p \sim 6 \cdot 10^{15}\text{ cm}^{-3}$. Условия легирования выбирались таким образом, что после диффузии не только все введенные атомы марганца в решетке оказывались в состоянии Mn^{++} , но также концентрация некомпенсированных дырок были достаточно низкой, чтобы можно было наблюдать заметную ФП. С помощью метода Холла установлено, что полученные образцы имели p -тип проводимости с $\rho \sim (6\text{--}7) \cdot 10^3\ \Omega \cdot \text{cm}$ с положением уровня Ферми $F = E_V + 0.38\text{ eV}$ и с концентрацией некомпенсирован-

ных дырок $p \sim 2 \cdot 10^{12}\text{ cm}^{-3}$. Если учесть, что марганец в кремнии создает два донорных уровня с энергиями ионизации $E_1 = E_C - 0.27\text{ eV}$ и $E_2 = E_C - 0.5\text{ eV}$ соответственно [10], то в полученных образцах оба этих энергетических уровня марганца при $T = 300\text{ K}$ являются практически пустыми, т.е. атомы марганца в основном находятся в состоянии Mn^{++} .

Фотоэлектрические свойства изучались при помощи инфракрасного спектрометра ИКС-21, специально снабженного криостатами, позволяющими исследовать образцы в широкой области температур, значений напряженности электрического поля и интенсивности фонового (интегрального) освещения. Фотопроводимость образцов исследовалась через двойной фильтр из полированного кремния, причем один из фильтров был установлен перед глобаром в окошке спектрометра, а другой в окошке криостата. Фоновое освещение создавалось с помощью лампы накаливания, а ее интенсивность регулировалась с помощью специального фильтра.

На рис. 1 представлена спектральная зависимость ФП образца при различных значениях фонового освещения. Как видно из рисунка, независимо от наличия фонового тока фототок начинается при $h\nu = 0.4\text{ eV}$ и с ростом энергии падающего света фототок резко уменьшается и достигает своего минимального значения при $h\nu = 0.45\text{ eV}$, т.е. имеет место достаточно глубокое ИКГФП (рис. 1, кривая 1). При дальнейшем увеличении энергии фотона фототок резко и непрерывно увеличивается и достигает максимального значения при $h\nu = 0.8\text{ eV}$. Таким образом, при наличии фонового освещения ИКГФП наблюдается при $h\nu = 0.42\text{--}0.5\text{ eV}$.

Как видно по характеру кривой I (рис. 1), независимо от наличия достаточного фонового тока в области $h\nu = 0.5\text{--}0.8\text{ eV}$ имеет место существенная примесная ФП, значение которой почти на 1.5 порядка больше, чем значение фонового тока. Поэтому следующие значения фонового тока были выбраны таким образом, чтобы они были значительно больше значения примесного

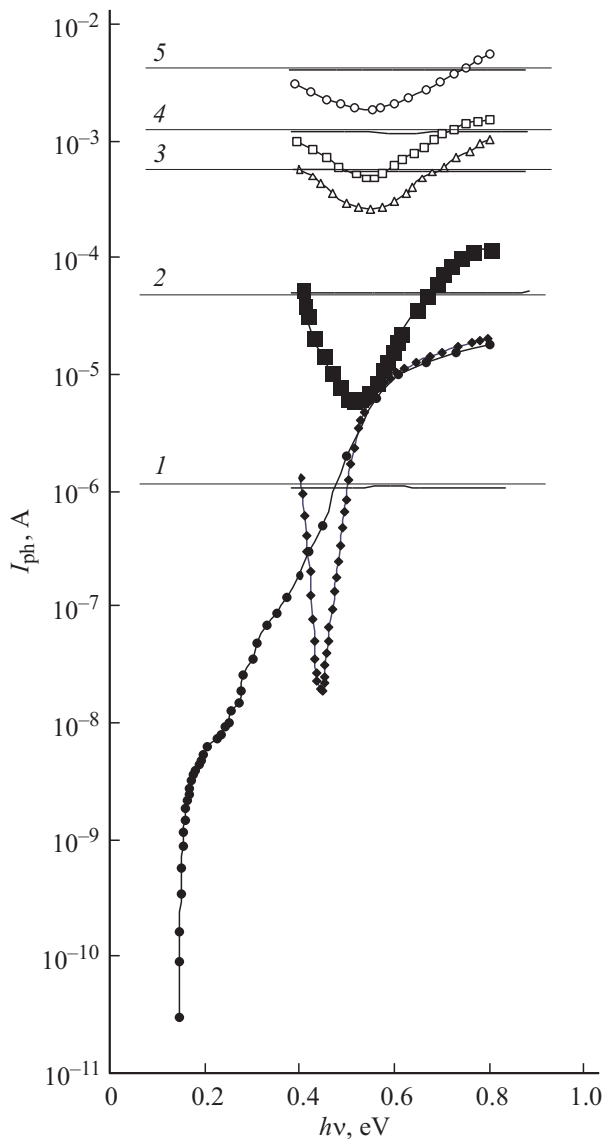


Рис. 1. Спектральная зависимость фотопроводимости при различных значениях фонового тока: 1–5 — фон 2, 4, 8, 16, 32 lx соответственно.

фототока при $h\nu = 0.8 \text{ eV}$, т.е. примесный фототок был незаметен на фоне фонового фототока. Как показали результаты исследования (рис. 1, кривая 2), при этом фотоответ также начинается при $h\nu = 0.4 \text{ eV}$, однако ИКГФП в этом случае начинается при $h\nu = 0.41 \text{ eV}$ и гашение достигает своего минимального значения при $h\nu = 0.5 \text{ eV}$, т.е. максимум гашения смещается в сторону больших значений энергий фотона, в то время как значение начала гашения смещается в сторону меньших энергий фотона. Как видно из результатов экспериментов, несмотря на высокое значение фоновой ФП, примесная ФП в области $h\nu = 0.6–0.8 \text{ eV}$ становится преобладающей (рис. 1, кривая 2). Далее спектральная зависимость ФП исследовалась при более высоких значениях фонового фототока (рис. 1, кривые 3–5). Такие исследования позволяют регистрировать слабый

ИК свет в области $h\nu = 0.4–0.8 \text{ eV}$ при наличии достаточно высоких уровней фонового фототока. Вместе с тем установлены закономерности изменения параметров ИКГФП от фонового фототока.

На рис. 2 представлена спектральная область существования ФП, а также энергии фотона, при которых имеет место максимальное значение ИКГФП в зависимости от фонового фототока. Как видно, ИКГФП в исследуемых материалах наблюдается в достаточно широком интервале значений фонового тока ($10^{-9}–6 \cdot 10^{-3} \text{ A}$). При этом соответственно расширяется спектральная область ИКГ, а его максимум сме-

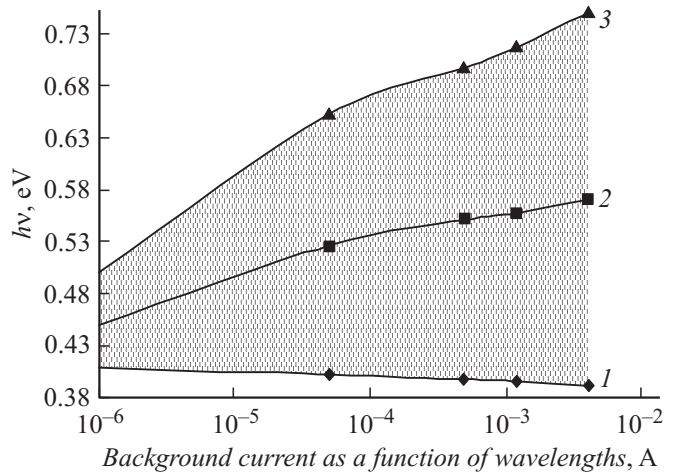


Рис. 2. Спектральная область существования ИКГ ФП (кривые 1, 3) и смещение энергии фотона (кривая 2), при которых наблюдается максимум гашения в зависимости от значения фонового тока.

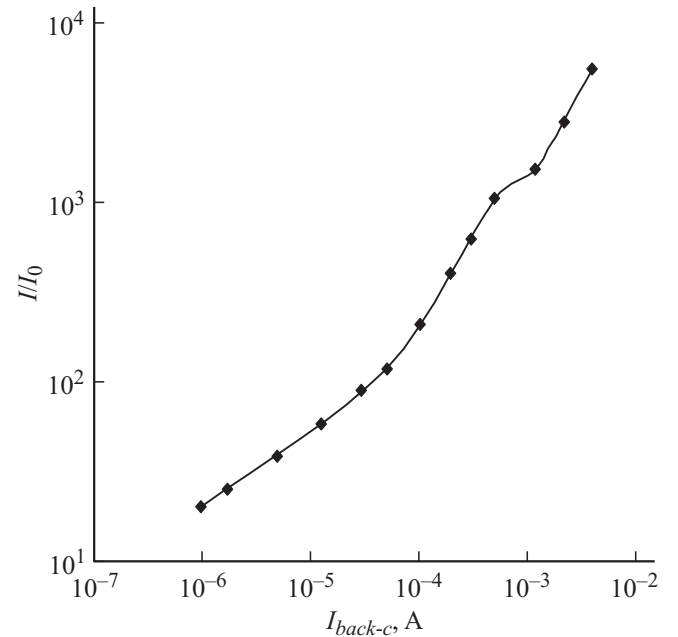


Рис. 3. Относительное увеличение примесной фотопроводимости при $h\nu = 0.8 \text{ eV}$ в зависимости от значения фонового тока.

щается в диапазоне от $h\nu = 0.45$ до 0.55 eV, кратность гашения ($K = \frac{I_{ph}}{I_{ph} + h\nu}$) соответственно уменьшается, но остается значительной даже при таких больших уровнях фонового тока. Относительное изменение примесной проводимости ($\frac{I}{I_0}$, I_0 — при наличии минимального фонового тока $\sim 10^{-6}$ А) в области $h\nu = 0.8$ eV от значения фонового тока представлено на рис. 3. При этом наблюдается очень интересное явление, т.е. существование эффекта очувствления в области $h\nu = 0.8$ eV, стимулированного фоновым освещением. Как видно из результатов (рис. 1, кривые 1–5), примесная фотопроводимость увеличивается почти на 2.5–3 порядка с ростом фонового освещения, хотя мощность падающего ИК излучения, величина приложенного электрического поля и температура остаются постоянными. Результаты исследований показали, что в исследуемых материалах ИКГФП наблюдается в достаточно широком интервале температур $T = 77$ – 240 К, и при этом спектральная область ИКГФП существенно не меняется.

Представленные результаты невозможно объяснить существующими теориями ИКГ, которые основаны на перезарядке дискретных уровней примесных атомов за счет фонового света.

Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет предположить, что многозарядные нанокластеры атомов марганца в кремнии создают спектр энергетических уровней в запрещенной зоне кремния в интервале $\Delta E = E_V + 0.16 - E_V + 0.6$ eV с различным сечением захвата электронов и дырок. Таким образом, кремний с многозарядными кластерами обладает уникальной особенностью ИКГФП, что позволяет разработать на их основе ИК фотоприемники в области $h\nu = 0.4$ – 0.8 eV, работающих при наличии фонового (как интегрального, так и собственного) освещения с достаточно широким диапазоном интенсивности. Особенность таких фотоприемников заключается в том, что они способны регистрировать достаточно слабые ИК спектры, особенно при $h\nu = 0.8$ eV, при наличии фонового света гораздо большей интенсивности, что представляет большой интерес в создании фотоприемников для волоконно-оптической связи.

Список литературы

- [1] Лукьянченко А.И. // ФТП. 1989. Т. 23. Вып. 5. С. 882–885.
- [2] Айибжонов М., Каримов М.А., Саидов М.С., Юлдашев Н.Х. // ФТП. 1996. Т. 30. Вып. 9. С. 1578–1584.
- [3] Podhorodecki A., Zatyb G., Misiewicz J., Gourbilleau F., Dufour C. // J. of Nanoscienc. Nanotechnol. 2010. Vol. 10. N 9. P. 5648–5652.
- [4] Курбанов М.А., Сулейманов Г.З., Сафаров Н.А., Гочуева А.Ф., Оруджев И.Н., Мамедова З.М. // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 4. С. 510–517.
- [5] Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел. М.: ИЛ. 1962. 559 с.
- [6] Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Саттаров О.Э. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 16. С. 11–18.
- [7] Бахадырханов М.К., Мавлянов Г.Х., Исамов С.Б., Аюпов К.С., Илиев Х.М., Саттаров О.Э., Тачилин С.А. // ЭОМ. 2010. № 3. С. 94–99.
- [8] Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Мавлянов Г.Х., Исамов С.Б. // ФТП. 2010. Т. 44. Вып. 9. С. 1181–1184.
- [9] Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Мавлянов Г.Х., Илиев Х.М., Исамов С.Б. // Микроэлектроника. 2010. Т. 39. Вып. 6. С. 426–429.
- [10] Болтакс Б.И., Бахадырханов М.К., Городецкий С.С., Куликов Г.С. // Компенсированный кремний. Л.: Изд-во Наука, 1972. 120 с.