

Инжекционное усиление фототока в поликристаллических кремниевых $p^+ - n - n^+$ -структурах

© Р. Алиев

Институт электроники Академии наук Узбекистана,
700143 Ташкент, Узбекистан

(Получена 20 февраля 1996 г. Принята к печати 7 июня 1996 г.)

Исследованы процессы инжекционного усиления фототока в структурах типа $p^+ - n - n^+$, изготовленных на основе поликристаллического кремния, выращенного на подложках из промышленного кремния. Обсуждены вопросы получения инжекционных фотоприемников и других бистабильных элементов с применением α -облучения и термообработки.

В отличие от монокристаллических, в поликристаллических полупроводниках путем варьирования ориентации и размеров зерен и электронных состояний на межзеренных границах (МЗГ) можно дополнительно управлять электрофизическими свойствами [1]. Именно изменения электронных состояний на МЗГ, возникающие при высокотемпературных операциях, обуславливают появление S -образной вольт-амперной характеристики (ВАХ) при прямых смещениях ($U > 0$) в поликристаллических кремниевых структурах с $p-n$ -переходом [2]. В работе [2] было высказано предположение о возможности изготовления инжекционных приборов с S -образной ВАХ на основе таких структур.

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке этой возможности на примере фотоприемников с внутренним усилением тока на основе поликристаллических кремниевых $p^+ - n - n^+$ -структур, полученных по технологии, описанной в [2], предполагавшей использование диффузии или ионной имплантации.

Структуры с диффузионным $p-n$ -переходом, имеющие напряжение включения $U_{d0} \leq 1.2$ В в прямом направлении, освещали белым светом со стороны перехода и измеряли ВАХ в прямом и обратном направлениях при температуре окружающей среды $\sim 30^\circ\text{C}$. Образцы имели фоточувствительность на участке ВАХ $U < U_{d0}$ в прямом направлении. Инжекционное усиление фототока практически не наблюдалось.

Эксперименты, проведенные на структурах с $p-n$ -переходом, полученным ионным легированием, показали аналогичные результаты только после их термообработки при температуре 800°C в течение ≥ 60 мин. Хотя напряжение включения у таких структур возрастает почти в 4 раза в результате термообработки [3], коэффициент усиления фототока не превышает $1.5 \div 2$. Максимальная фоточувствительность в прямом направлении смещения достигается при длительности термообработки $90 \div 120$ мин.

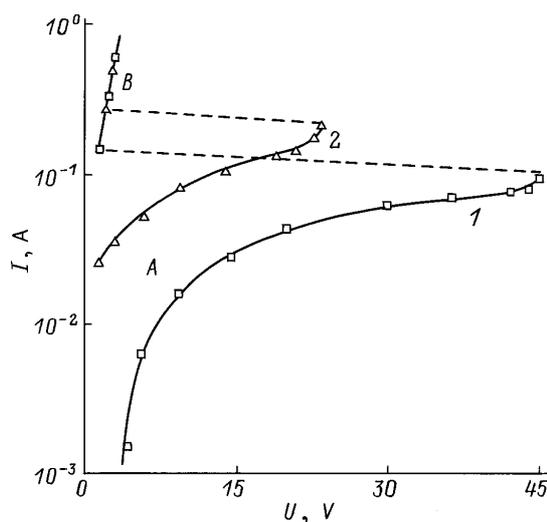
Эти результаты подтверждают, что возникновение S -образной ВАХ связано с шунтированием $p-n$ -перехода n^+ -каналом вдоль МЗГ в соответствии с моделью, предложенной в [2,3]. Однако стабильные S -образные ВАХ не являются достаточным условием для инжекционного усиления тока. Согласно [4], для достижения этого необходима еще модуляция проводимости n -базы структуры,

которая возможна только при ее высоком сопротивлении и толщине (d), намного превышающей диффузионную длину носителей заряда (L), $d \gg L$.

Другой путь достижения инжекционного усиления тока заключается в легировании базы примесями, дающими глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне кремния — типа Au, Zn, Hg. При этом обеспечивается τ -механизм инжекционного усиления тока (см. [4]).

Нами использовано облучение исследуемых структур непрерывным потоком α -частиц с энергией $E = 5$ МэВ и плотностью потока $j = 10^7 \div 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Как показывают эксперименты, ВАХ структур резко изменяется с повышением дозы (D) α -облучения; постепенное снижение прямого темнового тока в области $U < U_{d0}$ сопровождается быстрым ростом темнового напряжения включения U_{d0} (см. таблицу), что свидетельствует о достижении условий компенсации в базе. На рисунке приведены прямые ветви ВАХ образца размерами $5 \times 5 \text{ мм}^2$, подвергнутого облучению α -частицами дозой 10^{12} см^{-3} , измеренные в отсутствие освещения (кривая 1) и при освещении с плотностью мощности



ВАХ неосвещенной (1) и освещенной (2) белым светом поликристаллической кремниевой структуры $p^+ - n - n^+$. Участки A и B соответствуют неключенному и ключенному состояниям бистабильной ВАХ.

Основные параметры одной из исследуемых структур $p^+ - n - n^+$ и их изменение при α -облучении

$D, \text{см}^{-3}$	$I_0, \text{мА}$ ($U < 0$)	M (максимальные значения)	$I_0, \text{мА}$ ($U = 0.3 \text{ В}$)	$I_{d0}, \text{мА}$ ($U = U_{d0}$)	$U_{d0}, \text{В}$	$U_{\text{ph}0}/U_{d0}, \%$
0	3.0	1	0.06	—	—	—
10^9	2.9	2	0.04	0.45	0.9	10
10^{10}	2.4	12	0.14	200	—	—
10^{11}	1.7	80	0.035	5.8	6	15
10^{12}	0.7	230	0.01	80	45	45
10^{13}	0.34	235	0.005	88	58	48

$P_0 \approx 100 \text{ мВт/см}^2$ (кривая 2). Фоточувствительность структуры увеличивается по мере возрастания U_{d0} (см. таблицу). Следовательно, возрастает коэффициент усиления фототока, определяемый как $M = I_{\text{ph}}/I_0$ — отношение фототока $I_{\text{ph}} = I - I_d$ (I — полный, I_d — темновой токи) при $0 < U < U_{d0}$ к фототоку I_0 при обратном малом напряжении $U \approx 0$. Рост значения M с возрастанием U можно выразить приближенным соотношением Миллера для лавинного умножения фототока [5]:

$$M = \left[1 - (U/U_{d0})^n \right]^{-1}.$$

Показатель степени n у исследуемых структур относительно невысок и составляет $0.01 \div 0.02$, что резко отличает их от лавинных фотодиодов, в которых $n \geq 1$.

Освещение структуры приводит к снижению напряжения включения от значения U_{d0} до некоторого $U_{\text{ph}0}$, причем чем больше интенсивность освещения, тем больше разность $U_{d0} - U_{\text{ph}0}$. Для структуры, ВАХ которой показана на рисунке, $U_{d0} = 45.5 \text{ В}$, а $U_{\text{ph}0} = 23.8 \text{ В}$. Имеется критическое значение плотности освещенности, т.е. уровня фотогенерации G_{cr} , при котором S -фотодиод переходит из исходного A во включенное состояние B . При снятии освещения структура стабильно остается в режиме включения. Только путем уменьшения напряжения до некоторого порогового значения и ниже, $U \leq U_{\text{th}}$, можно вновь переключать ее в состояние A . Пороговое напряжение U_{th} для исследуемых структур составляет $0.6 \div 0.8 \text{ В}$. Критическая плотность освещенности составляет $200 \div 250 \text{ мВт/см}^2$ для α -облученных структур с $U_{d0} \approx 40 \div 50 \text{ В}$. Другими словами, данные структуры являются так называемыми "бистабильными элементами", управляемыми либо напряжением, либо освещением.

Для подтверждения механизма процесса, приводящего к описанным выше эффектам, основанного на шунтировании $p-n$ -перехода вдоль МЗГ [2] и компенсации в объеме базы, был проведен термоотжиг структур в режимах, снимающих наведенные α -облучением радиационные дефекты. Термоотжиг (ТО) осуществляли при $T = 100 \div 800^\circ\text{C}$ продолжительностью 60 мин в вакууме. Показано, что с ростом температуры ТО от 100 до 400°C наблюдается постепенное уменьшение U_{d0} в среднем от 45 до 24 В почти без изменения величины темнового тока включения I_{d0} . Дальнейший рост температуры ТО в диапазоне $400 \div 600^\circ\text{C}$ приводит к резкому снижению

I_{d0} почти на порядок с неоднородным изменением U_{d0} , вплоть до его возрастания до 33 В при $T = 600^\circ\text{C}$. После ТО при $T = 800^\circ\text{C}$ исходная ВАХ с $U_{d0} \approx 1.2 \text{ В}$ полностью восстанавливается. Другими словами, дефекты, вызванные α -облучением, приводившие n -базу в компенсированное состояние, полностью могут быть уничтожены при ТО. Это, с одной стороны, подтверждает предполагаемый механизм процесса, а с другой — иллюстрирует достаточно высокую воспроизводимость технологии получения структур с S -образной ВАХ.

Таким образом, имеется реальная возможность изготовления инжекционных фотоприемников с коэффициентом усиления ≈ 250 на основе поликристаллической структуры $p^+ - n - n^+$ на низкоомных подложках из металлургического кремния. Указанные структуры могут быть использованы в качестве бистабильных элементов, фотоключа, фототиристора и как составная часть фототранзистора с одним инжекционным переходом.

Список литературы

- [1] В.К. Георгиев, Л.И. Попова, Л.Е. Поляк, Л.К. Фионова. Поверхность. Физика, химия, механика, вып. 9, 5 (1990).
- [2] М.С. Саидов, Б.М. Абдурахманов, Р. Алиев, А.С. Саидов. ФТП. 30, 128 (1996).
- [3] R. Aliev, V.M. Abdurakhmanov, R.R. Bilylov. Interface Sci. (1996).
- [4] И.М. Викулин, В.И. Стафеев. Физика полупроводниковых приборов (М., Сов. радио, 1980).
- [5] С.М. Szy. Physics of semiconductor devices (N.Y.-London-Sydney-Toronto, 1969).

Редактор Л.В. Шаронова

The injection enhancement of photocurrent in polycrystalline silicon $p^+ - n - n^+$ structure

R. Aliev

Institute of Electronics, Uzbekistan Academy of Sciences, 700143 Tashkent, Uzbekistan

Abstract The processes of injection enhancement of photocurrent in polycrystalline silicon $p^+ - n - n^+$ structures grown on metallurgical silicon substrate have been studied. The preparing of the photoelectrical and bistable devices with the use of α -radiation and thermal annealing are discussed.