ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14 МЭВ НА СВОЙСТВА КРЕМНИЕВЫХ МАГНИТОДИОДОВ

И. А. КАРАПАТНИЦКИЙ, Э. И. КАРАКУШАН, Д. М. МУХАМЕДШИНА, Г. А. ЕГИАЗАРЯН, Н. У. ИСАЕВ, В. И. СТАФЕЕВ

Приведены результаты исследования воздействия облучения нейтронами с энергией 14 МэВ на время жизки неосновных носителей тока, удельное сопротивление базовой области и, следовательно, на параметры магнитоднодов КД301 и КД303.

В настоящее время одними из наиболее перспективных гальваномагнитных приборов являются магнитодноды. Их действие основано на принципе модуляции неравновесной проводимости толщи полупроводника базовой области диода, предложенном в работе [1]. При выполнении условия ехр $d/L \gg 1$ (где d — длина базы диода, L — диффузионная длина носителей) и высоких уровнях инжекции прямой ток зависит от отношения d/L следующим образом:

$$J \sim \exp\left[\frac{b+1}{\varphi_{\mathrm{T}}} U \exp\left(-\frac{d}{L}\right)\right].$$

Такая сильная зависимость обуславливает высокую чувствительность подобного рода приборов («длинных» диодов) к любым внешним факторам, изменяющим отношение d/L. Такое воздействие оказывает поперечное магнитное поле, которое, как известно, уменьшает дрейфовую подвижность носителей заряда (эффект Гаусса) и при высоких уровнях инжекции достаточно сильно искривляет их траекторию (увеличение эффективной длины базы [2]) и может приводить к ряду дополнительных явлений, влияющих на величину d/L.

В качестве основных параметров, характеризующих магнитодиод, кроме прямого падения напряжения U_0 и прямого тока I_0 используются токовая магниточувствительность

$$\gamma_I = \frac{\Delta I}{\Delta B}$$
 при $U_0 = \text{const}$

И ВОЛЬТОВАЯ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

$$\gamma_v = \frac{\Delta U}{\Delta B}$$
 при $I_0 = \text{const} [2, 3].$

В настоящей работе приводятся результаты исследования воздействия облучения нейтронами с E = 14 МэВ на характеристики и параметры магнитодиодов КД301 и КД303, а также на время жизни неосновных носителей и удельное сопротивление материала базы.

Образцы и методика эксперимента

Исследованные магнитодиоды КД301 и КД303 имели соответственно торцевую и планарную конструкцию. Исходным базовым материалом в обоих случаях служил кремний КМД-20 (кремний моносилановый, дырочный, $\rho_0 \ge 20 \text{ кОм} \cdot \text{см}$). Полупроводниковый кристалл магнитодиода КД304 имеет вид параллелепипеда с размерами $1,0 \times 0.5 \times 0.5 \text{ мм}^3$. Инжектирующий и невыпрямляющий контакты наносятся на всю площадь противоположных граней с размерами $0.5 \times 0.5 \text{ мм}^2$.

Исходный кристалл для образцов КД303 также имеет форму параллелепипеда с размерами $1,8 \times 1,0 \times 0,5$ мм³. Переходы и контакты площадью $0,5 \times 0,5$ мм² выполняются на одной из широких граней $1,8 \times 1,0$ мм² на расстоянии $\sim 0,5$ мм друг от друга. Поверхность образцов обоих типов защищена лаком.

Облучение проводилось при комнатной температуре на нейтронном генераторе, работающем в непрерывном режиме на смешанном дейтериево-тритиевом источнике. Энергия нейтронов составляла ~ 14 МэВ [4]. Для дозиметрии нейтронного потока использовались серные активационные детекторы.

Измерение характеристик облученных образцов осуществлялось при комнатной температуре через 16—18 часов после облучения. ВАХ магнитодиодов снимались на специально разработанной полуавтоматической установке [5]. Кроме ВАХ исследовались амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). При этом для различных фиксированных значений постоянного тока, протекающего через образец, снимались частотные зависимости амплитуды тока, возникающего под действием приложенного к образцу переменного напряжения. Методика обработки ВАХ для оценки времени жизни неосновных носителей и удельного сопротивления базы подробно изложена в [6].

Прямое падение напряжения и прямой ток

С ростом дозы облучения у всех исследованных образцов наблюдалось монотонное увеличение прямого напряжения в рабочей точке (I = 3 мA). На рис. 1 показаны характерные дозовые зависимости. В первом приближении экспериментальные кривые могут быть аппроксимированы двумя отрезками прямых с точкой излома в области доз (2,2÷ \div 2,8) \cdot 10¹¹ H/см². Значения коэффициента K_u в аппроксимирующем выражении вида

$$U_{\rm np} = U_{\rm np}^0 \left(1 + K_u \Phi\right)$$

приведены в табл. 1. Бо́льшие значения коэффициента K_u соответствуют образцам с меньшим начальным напряжением в рабочей точке.

Дозовые зависимости относительной величины тока в области его наибольшего изменения могут быть аппроксимированы эмпирической формулой

$$I/I_0 = \exp{(-K_I \Phi)}.$$

Приведенные значения коэффициента K_I вычислены для постоянного напряжения $U_{\rm пp} \approx 20$ В, когда начальное значение прямого тока близко к 10 мА. Рекомендуемая аппроксимация удовлетворительно описывает реальную зависимость в диапазоне доз до 2 · 10¹¹ H/см².



 Рис. 1. Дозовые зависимости прямого падения напряжения на магнитодноде в рабочей точке (l = 3 мА) для двух характерных образцов.
Рис. 2. Дозовые зависимости вольтовой магниточувствительности при B = 0,2 Т; кривые 1, 2 и 3 относятся соответственно к образцам с начальными напряжениями 10,4, 18,0 и 20,2 В.

-	a service			Габлица Т	
No	Коэф- фи- циент	Значение (см ² /Н)	Область интегральных потоков нейтронов (H/cm ²)	Эмпирическая формула	
1	Ku	$(3,5\div6,5)\cdot10^{-12}$ $(1,0\div2,0)\cdot10^{-12}$	Φ≈2,5·10 ¹¹ 2,5·10 ¹¹ ≈Φ≈8·10 ¹¹	$U_{\rm np} = U_{\rm np}^0 (1 + K_a \Phi)$	
2	KI	(1,2+2,3) · 10-11	Φ≈2·10 ^{¹¹}	$\frac{I}{I_0} \simeq \exp\left(-K_I \Phi\right)$	
3	K ^v _ĭ	$(0,4\div0,9)\cdot10^{-12}$	Для участка спада воль- товой магниточувстви- тельности	$\gamma_v = \gamma_v^0 (1 - K_{\gamma}^v \Phi)$	
4	K ^I	(1,1÷2,4)·10 ⁻¹¹	$\Phi \approx 2 \cdot 10^{11}$	$\frac{\Upsilon_I}{\Upsilon_I^0} \simeq \exp\left(-K_{\Upsilon}^I \Phi\right)$	
5	K _f	(0,6÷0,8)·10 ⁻¹¹	$\Phi \approx 8 \cdot 10^{11}$.	$f_{\rm r} = K_f f_{\rm r0} \Phi$	
6	K .	$(0,7 \div 1,0) \cdot 10^{-7} \text{ cek}^{-1}$	$\Phi \approx 1,8 \cdot 10^{11}$	$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_\tau \Phi$	

Примечание: значения коэффициентов № 1÷5 характерны для КД301; аналогичные величины для КД303 в среднем в два раза меньше.

125

4-287

При дальнейшем увеличении дозы изменение экспериментальных кривых значительно замедляется. Обратные токи исследованных образцов с ростом дозы облучения изменялись незначительно.

Магниточувствительность

Характер дозовой зависимости вольтовой магниточувствительности в значительной степени определяется начальным прямым напряжением в рабочей точке до облучения. На рис. 2 приведены характерные кривые для трех образцов с различными начальными напряжениями при напряженности магнитного поля B = 0.2 Т. Из представленных зависимостей следует, что монотонное уменьшение γ_v во всем диапазоне исследованных потоков свойственно образцам с более высоким начальным напряжением. При уменьшении величины $U_{\rm np}^0$ дозовая зависимость вольтовой магниточувствительности имеет максимум, причем соответствующая ему доза облучения находится в обратной зависимости от $U_{\rm np}^0$.

Участок спада вольтовой магниточувствительности может быть аппроксимирован линейной зависимостью

$$\gamma_v = \gamma_v^0 (1 - K_{\gamma}^v \Phi).$$

Величина K_{τ}^{v} слабо зависит от напряженности магнитного поля, преимущественно уменьшаясь с ее ростом.

Характер влияния облучения на зависимость $\gamma_v(B)$ также связан с величиной начального напряжения в рабочей точке. До облучения указанная зависимость либо плавно нарастает и стремится к насыщению (для $U_{np}^c \simeq 10$ B), начиная с B = 4 кГс, либо имеет максимум (для $U_{np}^0 \simeq$ $\simeq 18 \div 20$ B) и затем падает. Облучение нейтронами с E = 14 МэВ дозой $3 \cdot 10^{11}$ H/cm² не изменяет характера обсуждаемой зависимости для образцов со сравнительно низкими начальными напряжениями (~ 10 B) и приводит к исчезновению экстремальной точки у образцов с более высокими напряжениями. При этом величина индукции магнитного поля, при которой начинается насыщение характеристики γ_v (B), остается близкой к 4 кГс. Влияние облучения на вольтовую магниточувствительность КД303 несколько слабее.

Дозовые зависимости относительной величины токовой магниточувствительности приведены на рис. 3. В области наибольшего изменения они могут быть аппроксимированы выражением

$$\frac{\Upsilon_I}{\Upsilon_I^0} = \exp\left(-K_7^I\Phi\right),$$

где γ_I^0 — значение токовой магниточувствительности до облучения. Величина K_I^I для исследованных образцов практически не зависит от напряженности приложенного магнитного поля, но связана с начальным значением напряжения в рабочей точке. Экспериментальные результаты для КД301 приведены в табл. 2.

Амплитудно-частотные характеристики

В исследованном частотном диапазоне (0 ÷ 40) кГц величина дифференциального сопротивления магнитодиодов монотонно возрастает при частотах выше 2÷3 кГц. Облучение увеличивает значение R_i и одновре-



Рис. 3. Дозовые зависимости относительной величины токовой магниточувствительности; кривые 1, 2 и 3 относятся соответственно к образцам с начальными напряжениями 10,4, 18,0 и 20,2 В.

Рис. 4. Дозовые зависимости «граничной» частоты; кривые 1 и 2 относятся соответственно к образцам с начальными напряжениями 10,4 и 18,0 В.

	Таблица 2	
U ₀ [B]	$K_{\rm T}^{I} \cdot 10^{11} {\rm cm}^2/{\rm H}$	
1012	2,4	
16÷18	1,9 -	
20	1,1	

менно расширяет частотную область постоянства его относительной величины. Полученные характеристики имеют достаточно сложный вид, но до 10 ÷ 15 кГц удовлетворительно аппроксимируются выражением вида

$$|Z| = |Z_0| \sqrt{1 + (\omega \tau)^2}.$$

На рис. 4 показаны дозовые зависимости т. н. «граничной» частоты f_r . Под этой величиной подразумевается частота сигнала, на которой происходит увеличение дифференциального сопротивления R_t в 2 раза. Приведенные экспериментальные результаты хорошо аппроксимируются зависимостью $f_r = K_f f_{ro} \Phi$, где $f_{r0} -$ «граничная» частота до облучения. Величина коэффициента K_f в наших экспериментах лежала в пределах (0,65 \div 0,8) \cdot 10⁻¹¹ см²/Н. При этом минимальное значение относится к образцам с начальным напряжением \sim 20 В, а максимальное — к образцам с начальным напряжением \sim 10 В.

Для доз $\Phi \leq 1,6 \cdot 10^{11}$ H/см² значение параметра $\tau_f = 1/(2 \pi f_r)$ достаточно близко к величине времени жизни т неосновных носителей в базе магнитодиода, найденной из обработки ВАХ. При дальнейшем увеличении дозы значения τ_f становятся заметно меньше величины τ .

Время жняни и удельное сопротивление

Зависимости, описывающие изменение времени жизни неосновных носителей в базе с величиной интегрального потока нейтронов с энергией 14 МъВ, представлены на рис. 5. Для доз, меньших (1,4÷1.8) · 10¹¹ H/см², коивая хорощо аппроксимируется линейной зависимостью

$$\frac{1}{\tau}=\frac{1}{\tau_0}+K_{\tau}\Phi,$$

где K_{\pm} — ковффициент радиационной деградации временч жизни. Для рассматриваемого участка K_{\pm} лежит в пределах . (0,7 ÷ 1,0) × × 10⁻⁷ см²/H·сек, при дальнейшем увеличении дозы K_{\pm} уменьшвется. Достаточно хорошее совпадение полученной нами дозовой зависимости

$$\Delta\left(\frac{1}{\tau}-\frac{1}{\tau_0}\right)=f(\Phi)$$

с известными результатами работ, выполненных на монокристаллах высокоомного кремния, близкого к базовому материалу магнитодиодов [7], поэволяет обоснованно, на наш вэгляд, предположить, что облучение быстрыми нейтронами преимущественно изменяет объемное время жизни неосновных носителей, слабо влияя на рекомбинационные свойства повеохности.



Рис. 5

Рис. 6.

Рис. 5. Дозовые зависимости величины $1/\tau$; кривые 1 и 2 относятся соответственно к образцам с начальными напряжениями 10,4 и 18,0 В. Рис. 6. Зависимости величины относительного изменения диффузионной длины $a = \Delta L/L$; кривые 1, 2, 3 и 4 относятся соответственно к магнитным полям \sim напряженностью 0,3; 0,4; 0,5 и 0,6Т для образца с начальным напряжением 10,4 В; кривые 1', 2', 3' и 4' — аналогичные зависимости для образца с начальным напряжением 20,2 В.

Эначения удельного сопротивления базы магнитодиода, полученные из анализа ВАХ, лежат в пределах $30 \div 45$ кОм см, что достаточно хорошо согласуется с техническими данными для исходного кремния КДМ-20. Для зависимости $\rho_0 = f(\Phi)$ характерно либо монотонное уменьшение величины удельного сопротивления во всем диапазоне исследованных доз. либо спад до доз ~ 2.10¹¹ H/см² и медленное возрастание при дальнейшем увеличении интегрального потока нейтронов.

К механизму изменения магниточувствительности образцов КД301

Анализ влияния облучения быстрыми нейтронами на ВАХ магнитодиодов в отсутствие магнитного поля [6, 8] показал, что полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены на основе описания ВАХ «длинных» днодов [1, 2] и данных по изменению электрофизических параметров исходного материала базы [7, 9]. Сложнее обстоит дело с интерпретацией дозовых зависимостей магниточувствительности. Связано это в первую очередь с отсутствием строгой теории магнитодиодов. При выводе выражений, применяемых в настоящее время для описания изменения прямого тока в магнитном поле, учитываются два основных эффекта его воздействия на неравновесную проводимость базы: уменьшение дрейфовой подвижности носителей и искривление траекторий их движения [2]. Полное изменение эффективной длины диффузионного смещения при этом зависит только от величины подвижности носителей и напряженности магнитного поля.

Исследование влияния нейтронного облучения на характеристики магнитодиодов дает возможность экспериментально проверить справедливость такого допущения. Использованные в наших экспериментах интегральные дозы нейтронов не превышали $8 \cdot 10^{11}$ H/cm², что позволяет при комнатных температурах считать подвижность носителей практически неизменной. Обработка прямых ветвей ВАХ магнитодиодов в магнитных полях напряженностью до 0,6 T до и после облучения показывает, что при высоких уровнях инжекции они удовлетворительно аппроксимируются экспоненциальной функцией. С помощью этой аппроксимации находилась эффективная диффузионная длина носителей в магнитном поле, а затем оценивалось ее относительное изменение под действием магнитного поля — $a = \Delta L/L$.

На рис. 6 представлены экспериментальные значения величины *a*, полученные обрабсткой ВАХ двух характерных образцов с начальными напряжениями в рабочей точке 10,4 и 20,2 В. Для удобства сопоставления данные представлены в зависимости от отношения *d/L* (величина *d/L* определялась из ВАХ в отсутствие магнитного поля для каждой дсзы облучения).

Уменьшение величины a с ростом d/L, а значит и дозы облучения, свидетельствует о том, что в формировании магниточувствительности структур типа КД301 помимо вышеназванных эффектов значительную роль играют дополнительные механизмы. Одним из них, на наш взгляд, может быть уменьшение эффективного времени жизни при отклонении носителей к поверхности под действием магнитного поля.

Поступила 10.ХП.1979

ЛИТЕРАТУРА

1. B. H. Craces. MTD, 28, 1631 (1958).

- 2. В. И. Стафеев, Э. И. Каракушан. Магнитодноды, Изд. Наука, М., 1975.
- 3. И. М. Викулин, В. И. Стафеев. Полупроводниковые датчики, Изд. Советское радно. М., 1975.
- 4. В. В. Сокольский. Сб. Активационный анализ, Изд. Фан, Ташкент, 1971, стр. 283.
- 5. И. А. Карапатницкий, А. Д. Сартбаев. ПТЭ, № 4, 238 (1978).
- 6. И. А. Карапатницкий и др. ФТП, 13, 1120 (1979).
- 7. И. Д. Конозенко и др. Радиационные эффекты в кремнии. Изд. Наукова думка, Кнев. 1974.
- 8. Г. А. Егиазарян и др. ФТП, 13, 1243 (1979).
- 9. В. С. Вавилов, Н. А. Ухин. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах, Атомиздат, М., 1969.

14 ՄԷՎ ԷՆԵՐԳԻԱՅՈՎ ՆԵՅՏՐՈՆՆԵՐԻ ԱԶԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԱՅԻՆ ՄԱԳՆԻՍԱԴԻՈԴՆԵՐԻ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ

Ի. Ա. ԿԱՐԱՊԱՏՆԻՑԿԻ, Է. Ի. ԿԱՐԱԿՈՒՇԱՆ, Դ. Մ. ՄՈՒԽԱՄԵԳՇԻՆԱ, 2. Հ. ԵՂԻԱՁԱՐՏԱՆ, Ն. ՈՒ. ԻՍԱԵՎ, Վ. Ի. ՍՏԱՖԵԵՎ

THE INFLUENCE OF 14 MeV NEUTRONS ON THE CHARACTERISTICS OF SILICON MAGNETODIODES

I. A. KARAPATNITSKIJ, E. S. KARAKUSHAN, D. M. MUKHAMEDSHINA, G. A. EGIAZARYAN, N. U. ISAEV, V. S. STAFEEV

The influence of neutrons with energy of 14 MeV on the lifetime of minority carriers, on the specific resistance of the base region, and hence on the parameters of KD - 301, KD - 303 magnetodiodes, was studied experimentally.